

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р.



Виходить 6 разів за рік

КИЇВ

Том 4, № 4, 1998

KYIV

ЗМІСТ

- Грицик В. В. Інформаційні технології і системи в космічних дослідженнях: стан і перспективи
1. Войчишин К. С., Микитин Г. В. Концептуальні аспекти стандартизації засобів інформатизації у галузі космічних досліджень
2. Погрібний В. О., Собульський А., Рожанківський І. В., Грень Я. В., Джицімський З. Адаптивний кореляційний аналіз локально-стаціонарних випадкових сигналів для бортових експериментів
- Олексів Б. Я. Організація обчислень, керованих потоками даних для бортової обробки інформації в реальному часі
- Погрібний В. О., Рожанківський І. В., Таянов С. А. Бортова інформаційна система для дослідження потоків часток в навколоземному просторі
- Вальковський В. А., Зербіно Д. Д. К проблеме использования клеточных автоматов в качестве космических бортовых вычислительных устройств
- Мандзий Б. А., Беляев В. П., Волочий Б. Ю. Метод надійнісного моделювання самовідновлюваних бортових інформаційних систем

CONTENTS

- 3 Hrytsyk V. V. Information technologies and systems in space research: state and prospects
- 21 Voichyshyn K. S., Mykytyn G. W. Conceptual aspects of standardization of informatization means in space research
- 30 Pohribnyi V. O., Sobulskyi A., Rozhankivskyi I. V., Hren' Ya. V., Dzycimskyi Z. Adaptive correlational analysis of local-stationary casual signals for onboard experiments
- 36 Oleksiv B. Ya. Organization of dataflow-controlled calculations for onboard real-time information processing
- 44 Pohribnyi V. O., Rozhankivskyi I. V., Taianov S. A. On-board information system for the investigation of particle fluxes in the circumterrestrial space
- 49 Val'kovskii V. A., Zerbino D. D. On the use of cellular automata as space-borne calculation systems
- 55 Mandziy B. A., Belyaev V. P., Volotchiy B. Yu. Method for the reliability modeling of self repairing onboard information systems

Кравець І. І., Опотяк Ю. В. Нарощувані системи збору інформації та їх застосування на борту пілотованих космічних станцій	61	<i>Kravets I. I., Opotiak Yu. V. Scalable data gathering systems and their implementation on board flying space stations</i>
Гече Ф. Э. Обработка дискретных космических изображений в расширенном пороговом базисе	67	<i>F. E. Geche Processing of discrete space images within broadened threshold base</i>
Айзенберг И. Н. Эффективные алгоритмы обработки космических изображений и их реализация на клеточных нейросетях	74	<i>Aizenberg I. N. Efficient algorithms for space image processing and their realization in cellular neural networks</i>
Драган Я. П., Яворський Б. І. Методика побудови підсистем візуалізації космічної інформації	85	<i>Drahan Ya. P., Yavorskyi B. I. Method for the development of subsystems of space information visualization</i>
Деркач Б. Т. Структуры данных для высокопроизводительных систем обработки космической информации	93	<i>Derkach B. T. Data structures for space data computation on high-performance computer systems</i>
Воробель Р. А. Ковзні рангові перетворення аерокосмічних зображень з класифікацією елементів за характеристиками об'єктів	97	<i>Vorobel R. A. Moving rank transformations of airspace images with pixel classification by object characteristics</i>
Чинок В. М. Інформаційний відеоскоп — базовий елемент автоматизованого робочого місця космонавта-дослідника	103	<i>Chynok V. M. Information vision system — a basic element of an automated working place for astronaut researchers</i>
Коваль О. І., Косаревиц Р. Я., Русин Б. П. Про один підхід до підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень у космічних дослідженнях	108	<i>Koval O. I., Kosarevych R. Ya., Rusyn B. P. One more approach to the improvement of resolution of complex-structured images</i>
Косаревиц Р. Я. Апроксимація контурів образів для їх класифікації при дистанційному зондуванні Землі	114	<i>Kosarevych R. Ya. Approximation of image boundaries for their classification in the remote sensing of the Earth</i>
Яцків Д. Я. Сучасний стан використання лазерної технології в системах космічного зв'язку, локації та екологічного моніторингу	118	<i>Yatskiv D. Ya. The current state of the art in the use of the lasers in space communication, laser ranging and remote sensing</i>
Войчишин К. С. Аналіз закономірностей мікро-макроструктури сонячної циклічності	132	<i>Voichyshyn K. S. Analysis of micro-macrostructure regularities in the cyclic recurrence of the solar activity</i>
Кисіль Б. В. Імітаційне моделювання, методи теорії хаосу та фракталів в космічних дослідженнях	138	<i>Kysil' B. V. Imitative modelling and methods of chaos theory and fractals in space research</i>
Бун' Р. А., Густі М. І., Ліщенко В. І. Спеціалізована ГІС для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону на базі даних дистанційного зондування Землі	145	<i>Bun' R. A., Husti M. I., Lishchenyuk V. I. Specialized GIS for estimating the carbon budget of the carpathian region based on the Earth remote sensing data</i>
Попов Б. О. Представлення функцій у системах керування	151	<i>Popov B. O. Representation of functions in control systems</i>
Камінський Р. М. Моделювання динаміки оперативності космонавта в умовах тривалого перебування в пілотованих системах	156	<i>Kaminskyi R. M. Modelling the astronaut operativity dynamics in condition durable stay in pilotage systems</i>
НАШІ АВТОРИ	166	OUR AUTHORS
НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ	170	NEWS FROM SPACE AGENCIES

УДК 681

Інформаційні технології і системи в космічних дослідженнях: стан і перспективи

В. В. Грицик

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 11.05.98

Висвітлено результати основних фундаментальних та прикладних розробок, проведених в галузі інформаційних технологій і високопродуктивних обчислювальних систем для космічних досліджень, які виконувались у рамках секції інформатики Державного Західного наукового центру НАН України і Міністерства України у справах науки і технологій. Зроблено огляд основних наукових праць, розглянуто стан і перспективи досліджень та розробок, їх місце у світовій науці.

ВСТУП

Здобутки вчених Державного Західного наукового центру НАН України і Міністерства України у справах науки і технологій (ЗНЦ) у дослідженні космосу є важливими для розробки принципово нових інформаційних технологій і високопродуктивних систем відбору, обробки, передачі і зберігання даних, отриманих в рамках фундаментальних та прикладних розробок і реалізації важливих державних науково-технічних програм, міжнародних космічних програм і проектів, численних замовлень державних органів, підприємств та установ, що виконувались під керівництвом провідних вчених, спеціалістів та фахівців широкого профілю упродовж останніх десятиріч. Деякі з цих результатів опубліковані в узагальнюючій п'ятитомній монографії «Паралельна обробка інформації» [76–80], в інших монографіях, статтях та авторських свідоцтвах.

На базі Секції інформатики ЗНЦ були започатковані всесоюзні школи-семінари «Розпаралелювання обробки інформації» (1977), проведені міжнародні конференції «Інформаційні технології і системи» (1981), «Математичні методи в аналізі, сприйнятті та розпізнаванні образів», «Автоматика-95» (1995), ряд всесоюзних семінарів і нарад, де вагомий науковий внесок був здійснений у напрямку дослідження космічних глибин.

1998 рік знаменний святкуванням 80-х роковин Національної академії наук України. У даній роботі висвітлена частка вкладу наукових шкіл в галузі інформатики Західного наукового центру Національної академії наук України у світові дослідження космічних глибин. У галузі інформатики Західного наукового центру НАНУ і Міннауки України започаткували принципово нові напрямки досліджень, і тому слід відзначити

відповідні традиції та здобутки вчених Академії наук. Тут працювали відомі вчені і фундатори інформатики академік АН СРСР А. А. Харкевич, член-кореспондент АН СРСР К. Б. Карандеев, академік АН УРСР М. М. Шумиловський, член-кореспондент АН УРСР В. М. Михайловський.

1. ТЕОРІЯ СИГНАЛІВ В АНАЛІЗІ ТА ОПРАЦЮВАННІ КОСМІЧНИХ ДАНИХ ПРО ПРИРОДНІ ЯВИЩА, СКЛАДНІ ПРОЦЕСИ І УПРАВЛІННЯ

Енергетична концепція. Потреби дослідження явищ у космічних глибинах у багатьох галузях природознавства стимулювали, а вже набутий досвід фундаментальних досліджень дозволив розвинути підхід до вивчення одного з аспектів передавання відомостей (інформації) з довкілля до об'єктів.

Драганом Я. П. створена наукова школа, пов'язана з розробкою енергетичної теорії стохастичних сигналів. Ця теорія дала засоби для відкриття багатьох нових фактів, можливість пов'язати їх з розрізненими відомими поняттями, узагальнити їх в одній теоретичній схемі та виявити справжню фізичну й математичну природу. Водночас вона дала обґрунтовані засоби практичних застосувань в космічних дослідженнях і при розв'язанні практичних задач, що втілені у відповідних проблемно-орієнтованих інформаційно-обчислювальних технологіях і спецпроцесорах.

Я. П. Драганом і його учнями вивчено характер ритмічності (стохастичної повторюваності) геофізичних полів, сонячно-місяцевих впливів і відхилень, зумовлених сонячною активністю та синоптичними явищами [60, 61]. Розглянуто аналітичні проблеми опису ритміки і стохастичних коливань, що привело

до усвідомлення потреби побудови їх моделей у вигляді відповідних типів випадкових процесів, коли ритміку визначає характер зміни їх імовірнісних характеристик.

Результати аналізу емпіричних даних стали аргументами при обґрунтуванні використання періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) як моделі простої ритміки, що ставило, у свою чергу, проблему вироблення засобів статистичного аналізу таких процесів і створення загальної концепції ритміки як стохастичного коливання. Для цього Я. П. Драганом глибоко вивчено цей клас випадкових процесів. Було встановлено як властивості їхніх двочастотних спектральних мір (кореляції гармонічних складових), так і вираз їх через стаціонарні компоненти, тобто у вигляді ряду стаціонарних пов'язаних випадкових процесів, модульованих гармоніками, кратних до основної частоти. Основну частоту задає період корельованості.

Я. П. Драган дослідив майже- та поліперіодично корельовані випадкові процеси, що слугують моделями кратної ритміки природних явищ. Зокрема, біперіодично корельовані як моделі подвійної ритміки служать для опису групової структури хвиль та добово-сезонних змін характеристик метеорологічних явищ.

Паралельно з фундаментальними теоретичними дослідженнями розроблялись і прикладні питання їх застосувань і досить часто власне практичні потреби ставили вимоги до теоретичних досліджень, стимулювали їх.

Отримані результати та розвинуті методи імовірнісного опису і статистичного аналізу (до комп'ютерних програм включно) покладені в основу створення проблемно-орієнтованих інформаційно-обчислювальних технологій і спецпроцесорів у багатьох галузях науки та практичного використання. Серед них реалізовані у виконанні для ІЗМІРАН апаратури дослідження навколоземного простору (гальмінового опромінювання авроральних часток у верхніх шарах атмосфери) [58, 59], а також у системі стабілізації режиму складного процесу, коли носієм відомостей є стохастично збурена поверхня, а відбір відомостей реалізується її лазерним зондуванням [130].

Важливим ключовим здобутком Я. П. Драгана та його школи у розглянутій галузі є створення як висліді синтезу результатів досліджень, що велись упродовж багатьох років на підставі розвинутих і стисло сформованих вище ідей, енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС).

ЕК у теорії випадкових процесів дала змогу пов'язати багато відомих розрізнених її результатів, установити багато надзвичайно глибоких нових фактів, узагальнивши їх в одній теоретичній схемі та виявити справжню їх фізичну і формально математичну суть. Базована на ній теорія — ЕТСС стала могутнім знаряддям як теоретичних досліджень, так і обґрунтування практичних застосувань, які здобули визнання серед науковців. ЕТСС є далекою від узагальнення, доповнення і логічним завершенням класичної спектрально-кореляційної теорії випадкових процесів. Вона відкриває нові можливості практичних застосувань її здобутків у космічних дослідженнях, вивчення природних явищ, процесів [55, 57–61, 130–132].

Інформаційні сигнали та їх використання для побудови інформаційно-вимірювальних систем у космічних дослідженнях. Прагнення одержати ще більше відомостей про космічні глибини, складні процеси, будову речовини, властивості матеріалів, середовищ, об'єктів, систем тощо, стимулювало проведення досліджень з виявлення нових можливостей відбору інформативних параметрів.

Р. Ф. Федорівим проведені дослідження з теорії інформаційних сигналів та їх використання для побудови інформаційно-вимірювальних систем. Роботи відносяться до проблем фундаментальних та прикладних досліджень стохастичних сигналів і систем. У цьому напрямку вперше відображені результати досліджень інформаційних сигналів та їх використання для

побудови інформаційно-вимірювальних та обчислювальних систем [109, 111], що мають широке застосування у космічних дослідженнях.

Цим проблемам присвячено багато робіт з фізики газового розряду, експериментальної ядерної фізики, фотометрії, статистичної гідроакустики, теорії та практики інформаційно-вимірювальних систем, метрології.

У плані інтенсивних досліджень носіїв відомостей — сигналів Р. Ф. Федорівим проведені дослідження з виявлення нових можливостей відбору вимірювальної інформації (інформативних параметрів) за рахунок розкриття особливостей у структурі сигналів. Такою особливістю є імпульсний характер потоків енергії у вигляді електромагнітних та пружинних коливань, які для більшості випадків є носіями відомостей. Тривалість імпульсних ефектів приблизно 10^{-8} – 10^{-10} с. Тому ця властивість сигналів через інерційність радіоелектронних приладів практично не використовувалась.

Наступним важливим фактором є перетворення потоків енергії в електричний сигнал. У класичному варіанті поріг чутливості визначається рівнем теплових шумів. Перетворення імпульсних потоків енергії на порогових ефектах у потоки подій дозволяє у наведеному розумінні на декілька порядків покращити співвідношення сигнал/шум [110].

Досліджено фізику порогових ефектів та зв'язок імовірності настання подій з енергією вхідного сигналу. Запропоновано ідею та обґрунтовано моделі сигналів (потоків подій) у вигляді сукупності послідовностей однорідних інформаційних елементів. На відміну від класичних сигналів ослаблення означає безповоротну втрату інформаційних елементів.

Введено поняття інтервалу квазіергодичності як апріорної передумови статистичного перетворення сигналів [110].

Р. Ф. Федорівим розроблено основи теорії певного класу інформаційних сигналів. Досліджено їх властивості, проведено класифікацію, запропоновано два представлення сигналів: часове та поелементне. Досліджено можливості впливу на тривалість інтервалу квазіергодичності при реалізації відбору вимірювальної інформації.

Досліджено результати статистичного перетворення сигналів з метою їх очищення при відборі інформації, з метою зменшення обсягу при передачі і з метою оцінювання числових характеристик, їх відношення та різниці. Запропоновано нові та дано класифікацію відомих методів статистичного перетворення, отримано явні аналітичні вирази для законів розподілу, статистичної помилки та інерційності результатів перетворень [54].

Представлено алгоритми статистичного та функціонального перетворення сигналів у вигляді стохастичних, в загальному випадку нелінійних диференціальних та різницевих рівнянь. На цій основі розвивається спільний математичний апарат для опису алгоритмів і опису функціонування динамічних систем першого порядку, які по суті є спеціалізованими обчислювальними пристроями статистичної оцінки та функціонального перетворення сигналів.

Розроблено методику синтезу алгоритмів перетворення за заданою функцією від числових характеристик інформаційних сигналів. Оскільки задача синтезу має багато розв'язків, то запропоновано метод цілеспрямованого синтезу алгоритмів оптимальних відносно наперед заданих критеріїв (статистична помилка, інерційність перетворення та ін.) [113].

Розроблено спеціалізовані обчислювальні пристрої оцінювання числових характеристик інформаційних сигналів: оцінювання характеристик істинної інтенсивності у радіометричному та спектрометричному каналах, відношення та різниці інтенсивностей, оцінювання інтервального часу, коливання швидкості та ін.

Р. Ф. Федорівим і його учнями розроблені системи автома-

тичного керування за інформаційними сигналами: системи автоматичної стабілізації енергетичної шкали гамма-спектрометричної апаратури, системи автоматичного пошуку, виділення та відбору початку відліку хвильової картини сигналу акустичного зонда, системи «сліпого» супроводу штучних небесних тіл.

Запропоновані системи автоматичного керування фактично забезпечили якісний відбір інформації при реалізації кількісного аналізу елементного складу недоступних середовищ методами ядерної спектрометрії, реалізували динамічний акустичний каротаж, реалізувати реєстрацію світлових образів практично невидимих штучних небесних тіл.

Розроблено комплекс інформаційно-вимірювальних систем для автоматизації наукових досліджень.

Під керівництвом Р. Ф. Федоріва створено комплекс фотометричних систем відбору та обробки інформації та розроблено генератори інформаційних сигналів із зразковими часовими характеристиками для метрологічного забезпечення створених інформаційно-вимірювальних систем [4, 7, 21, 23, 24].

Адаптивна цифрова обробка сигналів для побудови високоефективних космічних бортових систем та спецпроцесорів реального часу. При проведенні багатьох фізичних експериментів у верхніх шарів атмосфери і космічному просторі, які мають важливе наукове та прикладне значення, досліджують параметри випадкових фізичних полів — електричних і магнітних, а також параметри потоків енергійних часток. Під їх впливом на виходах відповідних первинних вимірювальних перетворювачів (давачів) формуються випадкові електричні сигнали — неперервні і у вигляді послідовностей імпульсів.

Обробка таких сигналів під час або після експерименту необхідна для побудови та уточнення моделей відповідних фізичних полів. Стосовно обох видів сигналів вона різна. Для неперервних сигналів обробка найчастіше полягає у цифровій фільтрації, кореляційному аналізі, дискретному перетворенні Фур'є (ДПФ), стиску даних. Для випадкових послідовностей імпульсів знаходять енергетичний спектр, часові зміни інтенсивності послідовності, здійснюють ідентифікацію імпульсів та їх корекцію. При комплексних експериментах досліджуються стохастичні взаємозв'язки також і між цими двома видами випадкових сигналів.

Для дослідження фізичних полів в навколоземному просторі і трансмісії одержаних даних застосовують бортові системи. В складі останніх містяться давачі вимірюваних фізичних величин, апаратура обробки їх вихідних сигналів та телеметричні системи. В результаті бортових вимірювань одержують великі масиви даних, які в ряді випадків неможливо передати в реальному часі на землю в зв'язку з обмеженою пропускну здатністю телеметричних систем. Тому обробку таких даних найчастіше здійснюють на борту, а на землю передають лише її результати. Це дозволяє не тільки суттєво розвантажити телеметричні системи, але і автоматизувати процес проведення наукових досліджень, зменшити час наземної обробки з одночасним збільшенням надійності вимірів в цілому. Специфікою бортових систем безпілотних літальних апаратів є неможливість доступу до них оператора для ручної калібровки, налаштування, ремонту та складності оперативного втручання людини в процес експерименту на основі даних обробки.

Бортова обробка сигналів ускладнюється їх випадковим нестационарним характером, широкою смугою займаних частот, наявністю лише мінімальних апріорних відомостей та необхідністю одержання результатів в режимі реального часу. Нестационарність випадкових неперервних сигналів, які мають місце в процесі фізичних досліджень, проявляється в непостійності середнього значення, дисперсії та залежності кореляційних функцій від часу на окремих інтервалах реалізації, а імпульсних послідовностей — у змінності інтенсивності процесу, її різних змінах: мікроспілесах та бухтах інтенсивності.

Вказані фактори, а також високі вимоги до надійності, економичності та масо-габаритних показників бортової апаратури передбачають вибір методів обробки сигналів та принципів побудови бортових систем, відрізняються від використовуваних для побудови наземних. За допомогою відомих методів обробки випадкових сигналів і існуючої бортової апаратури не можуть бути розв'язані всі нові задачі, що цікавлять експериментаторів і виникають при вивченні тонкої структури випадкових фізичних полів і стохастичних зв'язків різних фізичних явищ.

У світових розробках з адаптивної цифрової обробки випадкових сигналів в реальному часі з використанням дельта-модуляції отримані вагомі результати. У даному огляді розглянуто вклад школи В. О. Погрібного у напрямку космічних досліджень, що пов'язані із застосуванням дельта-модуляції. В. О. Погрібним започатковано новий напрям досліджень і створена наукова школа з адаптивної цифрової обробки сигналів, де вперше розроблено методи та технічні засоби високопродуктивної адаптивної цифрової обробки одно- та двовимірних випадкових сигналів в реальному часі на підставі дельта-модуляції та принципи побудови відповідних бортових спецпроцесорів для автоматизації наукових досліджень і телекомунікації для постановки космічних експериментів [81, 84, 93, 95, 96, 99].

Для підвищення ефективності цифрової обробки в реальному часі подібних сигналів, з урахуванням вимог до бортових систем, доцільно використати адаптивні різницеві підходи в тому числі дельта-модуляцію (ДМ) в адаптивних методах і алгоритмах цифрової фільтрації, кореляційного аналізу, ДПФ та екстремального аналізу, а також спеціалізовані процесори на їх основі. Вони порівняно з універсальними процесорами більш швидкодіючі, економічніші, надійніші та технологічніші в плані виготовлення у вигляді великих інтегральних схем, орієнтованих на розв'язання конкретних задач, часто з розпаралелюванням математичних операцій.

Роботи з створення нових ефективних методів і засобів цифрової обробки одно- та двовимірних випадкових сигналів на основі різниць, які забезпечують високу роздільність бортової обробки в режимі реального часу і трансмісію одержаних даних в існуючих каналах зв'язку при проведенні фізичних експериментів у навколоземному просторі, виконувалася під керівництвом В. О. Погрібного в рамках комплексної програми «Інформаційно-вимірювальні системи для космічних досліджень», затвердженої на рівні АН СРСР та АН УРСР, а також постановами урядів України і колишнього СРСР.

У цьому напрямку В. О. Погрібним та його учнями були створені адаптивні методи дослідження в режимі реального часу випадкових ергодичних локально-стаціонарних неперервних сигналів і імпульсних послідовностей із змінною інтенсивністю з застосуванням ДМ, вибору параметрів ДМ для подання в цифровій формі одновимірних та двовимірних сигналів, способів підвищення роздільної здатності цифрової фільтрації, кореляційного та амплітудно-часового аналізу, дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) сигналів у форматах ДМ на основі вивчення метрологічних особливостей та імітаційного моделювання, створення на основі зазначених методів ефективних спецпроцесорів цифрової обробки сигналів (ЦОС) та телеметричних систем, орієнтованих на бортові фізичні експерименти та автоматизацію досліджень.

Для досягнення поставленої мети В. О. Погрібним і його науковою школою вперше були розв'язані наступні задачі: розроблено загальні підходи до визначення *a priori* частоти дискретизації та кроків квантування ДМ одно- та двовимірних випадкових сигналів; а також моделі ергодичних локально-стаціонарних неперервних випадкових сигналів та методи знаходження локально-стаціонарних інтервалів реалізації і адаптивної обробки таких сигналів в реальному часі; досліджено

моделі та адаптивні методи обробки в реальному часі локально-нестационарних потоків випадкових імпульсів із різкими змінами інтенсивності та накладаннями імпульсів; вивчено шляхи застосування ДМ в системах обробки з імпульсно-кодуючою модуляцією (ІКМ) [82, 83], розроблено загальний підхід до проведення математичних операцій над кодами ДМ; для цифрової фільтрації одержано загальні вирази для згорток величин, поданих у форматах ДМ-ДМ та змішаних ДМ-ІКМ, а також створено ефективні алгоритми функціонування та методи розрахунку і імітаційного моделювання цифрових фільтрів з ДМ; знайдено загальні вирази кореляційних функцій величин, поданих у форматах ДМ-ДМ [83, 93, 98] та змішаних, у взаємозв'язку різних форматів; досліджено метрологічні особливості кореляційного аналізу довгих і коротких часових рядів в різних форматах, в тому числі в змішаних, а також створено методи імітаційного моделювання та покращення точності кореляційного аналізу коротких рядів у форматах ДМ; створено новий вид цифрового подання сигналів — знакову ДМ, розроблено математичні операції на відповідних кодах та на основі цього запропоновано високоефективний кореляційно-спектральний спосіб виявлення в реальному часі коротких (до 30 відліків) періодичних сильно зашумлених сигналів; створено швидкі і економічні алгоритми ДПФ величин, поданих у форматах ДМ-ДМ і змішаних; опрацьовано загальні методи екстремального аналізу неперервних одно- та двовимірних випадкових сигналів на основі різниць і ДМ для ефективного тиску даних, а також точні методи відтворення сигналів після тиску; досліджено амплітудну, часову та інтегральну роздільні здатності екстремального аналізу; розроблено методи його імітаційного моделювання та покращення властивостей; а також адаптивні методи визначення в реальному часі різких змін інтенсивностей потоків випадкових імпульсів, їх енергетичних спектрів, а також корекції накладань імпульсів в реальному часі; розроблено принципи побудови ефективних бортових систем та спецпроцесорів обробки сигналів у реальному часі на основі запропонованих методів та алгоритмів, зокрема з використанням однорідних обчислювальних середовищ; розроблено економічні методи телевимірювань та завадостійкої, точної і з підвищеною пропускну здатністю трансмісії даних, поданих у форматі дельта-модуляції; впроваджено одержані результати через створення принципово нової апаратури з новими покращеними властивостями та програмного забезпечення однорідних обчислювальних середовищ для обробки випадкових сигналів та передавання одержаних даних, орієнтованої на наукові бортові експерименти в космічному просторі та автоматизацію досліджень.

Основним методом, який використовувався в цих дослідженнях, був адаптивний. Це пов'язано з тим, що бортова обробка нестационарних випадкових сигналів найефективніше здійснюється за допомогою адаптивних методів. При цьому цифрову обробку доцільно реалізувати на підставі ДМ, яка за своїм принципом є адаптивним видом цифрового подання, і використання якої, крім того, забезпечує економічні реалізації спецпроцесорів. Дані, одержані на підставі обробки, доцільно передавати за допомогою адаптивних телеметричних систем з підвищеною пропускну здатністю.

В. О. Погрібним і його учнями розроблено нові методи підвищення надійності [86] і пропускну здатності цифрових телеметричних систем з безнадлишковими кодами на основі вибору кодових комбінацій шумоподібних синхросигналів в залежності від довжин слів і кадрів, критерію розпізнавання спотворених завдама шумоподібних синхросигналів та на виявленні збоїв [91] в повідомленнях з тактовою самосинхронізацією через порівняння відповідних часових інтервалів [92].

Вперше розроблено фундаментальні підходи до визначення *a priori* основних параметрів дельта-модуляції — частоти дис-

кретизації, кроків квантування і розрядності ДМ-кодів — одновимірних випадкових сигналів та нерухомих і рухомих зображень на основі спектрів потужностей або амплітудних спектрів попередніх реалізацій [91, 94, 98]; запропоновано нові моделі ергодичних локально-стационарних та локально-стационарно пов'язаних неперервних випадкових сигналів, а також точні і швидкі методи знаходження біжучих локально-стационарних інтервалів реалізації з використанням аналізу процесу на ковано-дискретних вікнах його реалізації, засновані на дослідженні змін оцінок середнього і дисперсії процесу у вказаних вікнах відносно аналогічних його характеристик на адаптивно змінних довірчих інтервалах реалізації, спрямовані на високоефективну адаптивну обробку таких сигналів в реальному часі [148]; вперше побудовано модель потоків енергійних часток у вигляді локально-нестационарних потоків випадкових імпульсів із різкими змінами («мікросплесками» так «бухтами») інтенсивності відносно середньої і накладаннями імпульсів, яка стала основою створення високоефективних адаптивних методів обробки таких сигналів [88]; розроблено принципово нові структури адаптивних спецпроцесорів для цифрової фільтрації [92, 96], кореляційного та екстремального аналізу, ДПФ випадкових сигналів у реальному часі на основі запропонованих різнищевих методів та алгоритмів, зокрема з одно-розрядною ДМ і з розпаралелюванням операцій, доцільних для мультиконверсних систем і однорідних обчислювальних середовищ [89, 97, 148].

Виконані теоретичні та прикладні дослідження стали основою створення вперше принципово нових ефективних бортових систем для цифрової обробки випадкових неперервних сигналів і імпульсних послідовностей та трансмісії одержаних даних для космічних та стратосферних експериментів, що відрізняються від розроблених раніше пристроїв аналогічного призначення розширеними функціональними можливостями, покращеними метрологічними, масо-габаритними та енергетичними характеристиками [85, 87, 147].

Практична цінність роботи полягає в тому, що одержані результати сприяють створенню адаптивної бортової апаратури для вивчення в режимі реального часу випадкових електричних і магнітних полів та потоків енергійних часток в верхніх шарах атмосфери і космічному просторі, а також телеметричних систем для трансмісії даних. Вони дозволяють ставити нові та поглиблювати традиційні задачі, що стосуються методів дослідження і обробки випадкових нестационарних ергодичних сигналів та полів.

Запропоновані методи, алгоритми і принципи побудови інформаційно-вимірювальних систем можуть бути використані при реалізації апаратури для бортових океанологічних досліджень, наземних сейсмоністанцій та ядерної енергетики.

2. РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯ ТА ВИСОКОПРОДУКТИВНА ОБРОБКА КОСМІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ СИНТЕЗУ БОРТОВИХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЄНТОВАНИХ СИСТЕМ ТА СПЕЦПРОЦЕСОРІВ

Розпаралелювання обчислювальних процесів в обробці космічних даних. У циклі праць з розпаралелювання обчислювальних процесів в обробці космічних даних проведено фундаментальні та прикладні дослідження з вивчення питань, пов'язаних з організацією паралельної обробки даних з метою підвищення продуктивності обчислювальних систем і мінімізацією часу розв'язування задач. Розпаралелювання програм і процесів активно займаються з початку 1970-х років. Роботи проводилися як для універсальних моделей та постановок задач, так і для конкретних проблемних областей. Найвидатнішими дослідниками по даній проблематиці є Лемпорт Д., Келлер Р., Поспелов Д. А., Котов В. Є. та ін. Однак характерним

є те, що дослідження і результати українських вчених по тематичі паралельної обробки, які проводились в рамках різних підходів і формальних систем (Глушков В. М., Летичевський А. А., Капітонова Ю. В., Халілов А. І., Ющенко Е. Л., Цейтлін Г. Е. та ін.), зовсім не поступалися, а в багатьох випадках мали переваги над досягненнями інших шкіл. На сьогодні ситуація не змінилась. Серед вчених Західного наукового центру НАН України у цьому напрямку вагомі результати отримали Вальковський В. О., Деркач Б. Т., Кисіль Б. В., Олексів Б. Я., Калинин І. Н., Розгоні Ю. І., Кожан В. П., Опомяк Ю. В. та ін. [76–80]. Введено та вивчено різні моделі паралельних програм і систем, орієнтовані на різні способи реалізації і різні застосування. Для них формалізовано та уточнено варіанти задач максимального розпаралелювання та розроблено відповідні алгоритми, призначення яких — перетворити вихідну послідовну алгоритмічну конструкцію в максимально паралельну конструкцію, яка буде еквівалентною до вихідної. Отримана паралельна конструкція може представляти апаратно реалізовану систему, програму або безпосередньо паралельне обчислення, яке генерується в динамічному режимі. Запропоновано методи інтелектуалізації процесу отримання паралельної конструкції, зокрема, методи синтезу паралельних програм і систем за специфікаціями непроцедурного типу на основі формального опису предметної області. В цілому, комплекс запропонованих результатів можна охарактеризувати як теорію синтезу паралельних програм і систем.

Що стосується конкретних результатів, то, зокрема, В. О. Вальковським були доведені теореми, які створюють необхідні та достатні умови існування алгоритму максимального розпаралелювання в заданому класі схем. Використовуючи ці умови, вдалося побудувати такі алгоритми для ряду класів схем, наприклад, для вільних кінцевих схем та вільних лінійних схем. Для інших класів схем, зокрема, для класу стандартних схем, доведений факт неіснування такого алгоритму. Результати представлені в монографіях, учбовому посібнику, а також в ряді статей [34–45].

В рамках запропонованого підходу В. О. Вальковським був також побудований так званий алгоритм абсолютно-максимального розпаралелювання, який, у певному сенсі, є граничним при розв'язку задачі максимального розпаралелювання.

Характер обробки інформації бортовими обчислювальними комплексами такий, що обчислення, які проводяться, є вкладеними циклами. В плані розпаралелювання такого типу циклів нами узагальнено підхід Лемпорта та розроблено два оригінальні методи розпаралелювання: метод паралелізації та пірамід. Перший орієнтований для реалізації на обчислювачах загального вигляду, в той час як другий — на реалізації автономними незалежними гілками в обчислювальних системах з роздільною пам'яттю.

Низка результатів має яскраво виражену практичну орієнтацію для обробки космічних даних. Предметом досліджень в працях цієї групи є проблема конвеєризації обчислень, причому в основному на рівні машинного коду. Суть проблеми в тому, що, якщо реалізуючий конвеєрний процесор (в даному конкретному випадку — трансп'ютер) має глибину конвеєра h , то дистанція між залежними командами в машинному коді не може бути меншою ніж h . Якщо ж дистанція менша, то її слід «заповнити» іншими незалежними командами або, в крайньому випадку, порожньою операцією. Звідси виникає проблема максимального «ущільнення» машинного коду. В працях В. О. Вальковського і його учнів запропоновано алгоритми оптимізації машинного коду взагалі і субоптимальні алгоритми його ущільнення, зокрема. Порівняно ці алгоритми з іншими відомими алгоритмами, яке виявило перевагу перших. Якість розроблених алгоритмів визначається в першу чергу тим, що вони використовують ідеї елімінації неіснуючих залежностей

між операціями, які реалізуються в методах розпаралелювання.

Отримано важливі результати в галузі клітинних автоматів. Розглянуто спектр питань, пов'язаних з реалізацією арифметичних обчислень засобами різних автоматичних правил і в різних системах кодування. Доведено коректність пропонованих систем правил. Описано методи реалізації складних арифметичних виразів, в тому числі масових обчислень. Задачу розв'язано також в умовах відмови деяких комірок автомата. Розроблено програмну систему моделювання роботи клітинних автоматів та аналізу їх якості [43]. Універсальні клітинні автомати характеризуються максимальною простотою елементарних виконуючих пристроїв і «граничною регулярністю» їх з'єднання. Це обумовлює високий ступінь технологічності їх реалізації. Вони здійснюють асинхронну розподілену обробку даних з високим ступенем паралелізму. Нарощуванням робочого поля автомата можна добитися необхідного прискорення обчислення і заданого ступеня надійності. Тематичі клітинних автоматів присвячена одна із статей даного випуску.

Розпаралелювання та синтез високопродуктивних бортових проблемно-орієнтованих систем та спецпроцесорів. Проведено важливі фундаментальні та прикладні дослідження спрямовані на розробку методів паралельної обробки даних і синтезу бортових високопродуктивних проблемно-орієнтованих та спеціалізованих обчислювальних систем [76–80]. Дослідження у цій галузі були започатковані ще у 1970-х роках, з метою створення високопродуктивних структур обробки даних в системах реального часу. Ці розробки особливо важливі для космічних досліджень різних природних процесів; функціонування складних об'єктів, технологічних процесів, ситуацій в умовах, коли можливість участі оператора виключена, інформаційний інфраструктур різних рівнів, де потрібно здійснювати обробку великих масивів швидкоплинної інформації. Пошуки можливостей підвищення швидкодії обробки даних велись у різних напрямках. Теоретичною границею продуктивності послідовної обробки даних вважається обмеження рівня швидкості світла ($\sim 10^9$ оп/с). Разом з тим, практичні вимоги для розв'язування задач у ряді систем реального часу ставили проблему створення обчислювальних структур обробки даних з набагато вищою швидкістю. Одним з перспективних напрямків синтезу високопродуктивних систем обробки даних, є синтез проблемно-орієнтованих або спеціалізованих структур з заданим рівнем розпаралелювання алгоритмів [133–136, 140, 141].

Досліджено класи алгоритмів, що допускають розпаралелювання алгоритмів на заданому рівні. Розглянуто поняття алгоритму з точки зору обчислювальних функцій і досліджено можливість розпаралелювання процесу обчислення функцій відносно функцій із заданого класу. За тезами Тюрінга—Черча проблема обчислення функцій є рівнозначною виясненню її рекурсивності. Тому в теорії алгоритмів рекурсивні означення можна розглядати як алгоритми. При цьому, наприклад, частинно-рекурсивні функції — це клас функцій, який можна отримати з допомогою такої формалізації — представлення у вигляді термів в алфавіті простих функцій та операторів суперпозиції, рекурсії і мінімізації.

Це дало можливість, з однієї сторони, дослідити властивості різних алгоритмів з метою розпаралелювання та вивчити їх внутрішню структуру. З другої сторони — побудувати класи алгоритмів, що допускають розпаралелювання на заданому рівні.

Створено теоретичні основи синтезу високопродуктивних проблемно-орієнтованих і спеціалізованих систем обробки інформації, які відображають принципи ієрархічності, рекурсивності, глибокого розпаралелювання алгоритмів на заданому рівні з метою обробки інформації в темпі її надходження.

Отримано найбільш загальні термальні представлення моделей і алгоритмів, що відображають ієрархічність складних задач на різних рівнях. Ці представлення властиві для алгоритмів, з допомогою яких можна легко описати «ланцюгові» та «гіллясті» фізичні процеси, що характеризують стан складних технічних систем, об'єктів, довкілля, тощо.

Розроблено основи теорії алгоритмів і систем обробки швидкоплинної інформації, які мають паралельну структуру, а також одержано конструктивні підходи для побудови таких алгоритмів і систем з врахуванням їх фізичної і обчислювальної реалізації [76]. Запропоновано методи і алгоритми розпаралелювання обробки швидкоплинної інформації для реалізації за допомогою високопродуктивних спеціалізованих та проблемно-орієнтованих систем на базі системних обчислювальних середовищ і структур. Визначено класи алгоритмів, які допускають автоматичну реалізацію в системах реального часу.

У працях досліджено мультимедійне системне обчислювальне середовище. Джерело та приймач потоків даних в таких середовищах реалізують при необхідності через буферні запам'ятовуючі пристрої. Передача інформації у середовище здійснюється через регістрові комутаційні канали проходять за один такт на один елементарний процесор. Передача здійснюється в один або декілька сусідніх процесорів. Процеси налаштування і роботи обчислювального середовища розділені за часом. Спочатку формується потік команд для налаштування обчислювального середовища, потім здійснюється завантаження команди в регістри кожного процесора. Досліджуване середовище дозволяє практично необмежено нагромаджувати обчислювальні потужності в цілому системі обробки даних за рахунок збільшення поля середовища і максимального розпаралелювання на ньому.

Платою за це є збільшення труднощів реалізації обчислювального процесу, складання програм в кодах процесорів навіть для нескладних задач. Ця проблема є дуже важливою для будь-яких системних середовищ. Тому надзвичайно необхідною була розробка теоретичної бази для налаштування обчислювального системного середовища і паралельного програмування, створення математичних моделей їх функціонування, розробки інструментарію і методів розпаралелювання алгоритмів для таких середовищ. Важливою проблемою є розробка бібліотек мікропрограмних модулів і їх реалізація при налаштуванні системного середовища на заданий обчислювальний процес. Тому вперше розроблено мову паралельного програмування високого рівня FPL (Flow Programming Language), FPL-транслятор, методи і програми розпаралелювання при налаштуванні середовища на реалізацію обчислювального процесу, методи обслуговування бібліотек мікропрограмних модулів. Ці засоби є інструментарієм паралельного програмування, налаштування системних обчислювальних середовищ на виконання заданого алгоритму. Розроблені інструментарій та програмне забезпечення дозволили автоматично синтезувати надвисокопродуктивні спенпроцесори проблемно-орієнтовані обчислювальні засоби на базі системних середовищ для розв'язку задач в реальному часі.

На базі цього підходу можна синтезувати мобільні бортові обчислювальні засоби, здатні обробляти величезні потоки даних в реальному часі. Запропоновані методи також дозволяють швидко і ефективно переналаштовувати середовища на розв'язки різних задач, причому управління цим процесом здійснюється з спеціального центру, що особливо важливо при роботі у віддалених та важкодоступних місцях. Розроблена теоретична база, методи, конструктивні алгоритми є основою для програмування і налаштування різних багатопроекторних систем та спеціалізованих матричних обчислювачів, складних системних середовищ нейроподібного типу. Вперше була виготовлена принципово нова проблемно-орієнтована система на базі одно-

рідних обчислювальних структур СІГМА, де є можливість нагромаджувати обсяг її до одного мільйона елементарних процесорів. Ця система має високі показники ефективності для реалізації широкого класу задач обробки, розпізнавання об'єктів та зображень в реальному часі. У колишньому СРСР ці роботи були виконані за замовленням в 1980–1990 р. для використання у космічних дослідженнях. В світовій практиці аналогів таких розробок немає. На базі цих розробок створено потужний банк мікропрограмних модулів, що дозволяє ефективно здійснювати реалізацію дуже широкого класу обчислювального процесу на системних середовищах. У цьому напрямку підготовлено висококваліфіковані наукові та інженерні працівники. Важливі результати у цьому напрямку досліджень були отримані Олексієм Б. Я., Деркачем Б. Т., Кисілем Б. В., Глазєром С., Каліняком І. Н., Кожаном В. П., Опотяком Ю. В. У 1997 році для одного з часткових варіантів системного середовища, а власне, нейроподібного середовища поставлена проблема створення надвисокопродуктивних систем, яка реалізується за конкурсним проектом УНТЦ і за фінансовою підтримкою уряду США.

Розроблено концепцію, а також створено нові інформаційні технології і ефективні методи моделювання і експериментального дослідження нейроподібних спеціалізованих обчислювальних сіток і середовищ високої живучості для цифрової обробки та аналізу сигналів, обробки складних зображень (цифрова фільтрація, сегментація, розпізнавання, структурний аналіз). Розроблено і виготовлено високопродуктивні спенпроцесори і проблемно-орієнтовані системи на базі системних середовищ, які застосовуються для постановки обчислювальних експериментів при обробці складних зображень в реальному часі, а також розв'язку важливих народногосподарських задач і екологічних досліджень.

Створено експертну систему для автоматизації налаштування і дослідження обчислювальної структури для обробки і аналізу зображень на базі системних середовищ. Розроблено математичні моделі, алгоритми і експертну систему функціонального проектування та аналізу систолічних і хвильових процесорних матриць. Вперше синтезовано і виготовлено високоєфективні систолічні процесори для дослідження і цифрової обробки зображень в системах реального часу, які є базовими та істотно поліпшують основні показники систем обробки зображень порівняно з відомими.

Створено методологічні і програмні засоби побудови, реалізації високопродуктивних спеціалізованих і проблемно-орієнтованих систем відбору і обробки швидкоплинної телеметричної інформації в реальному часі. Розроблено і виготовлено принципово нові високопродуктивні обчислювальні структури для відбору, структурного розпізнавання і класифікації інформації про стан складних космічних систем, які на декілька порядків поліпшують ефективність обробки даних порівняно з існуючими. Ці системи призначені для постановки наукових експериментів, дистанційного зондування, а також використовувались при дослідженнях, запуску великогабаритної космічної системи «Буран» та успішно працюють на космічних станціях типу «Мир».

На базі нових інформаційних технологій, високопродуктивних засобів відбору інформативних ознак і обробки інформації у Державному науково-дослідному інституті інформаційної інфраструктури створений науково-дослідний степід для вивчення і розробки нових методів, закономірностей і високоєфективних засобів обробки швидкоплинної інформації в системах реального часу.

Розроблено нові проблемно-орієнтовані структури для управління складними процесами в системах, які показали високу ефективність в управлінні, для оцінки стану довкілля, та ін.

Високопродуктивні обчислювальні середовища для обробки даних в системах космічних досліджень. Розробка інформаційних технологій багатопроекторних систем конвеєрного типу функціонування та нейронних мереж, асоціативних і самоорганізовуваних систем є одним з важливих і перспективних напрямків розвитку сучасної інформатики. До числа першочергових задач, які розв'язують з допомогою таких систем, відносяться задачі аналізу, обробки і розпізнавання складних зображень, створення моделей функціонування і відтворення живої природи, штучного інтелекту, створення банків знань, експертних систем.

Разом з тим, засоби традиційних фон Нейманівських і навіть паралельних систем не є адекватними переліченим проблемам. Це зумовлено перш за все тим, що швидкодія окремих пристроїв в цих системах наближається до своєї природної межі, обумовленої швидкістю світла.

Розвиток технології надвеликих інтегральних схем (НВІС) сприяв значному зменшенню вартості обладнання і, можливо, скоро можна буде включати в конструкцію необхідну кількість елементів для розв'язку достатньо великих задач. Далі, для повного використання переваг НВІС необхідно максимально використовувати апаратуру, що в ній міститься. Це, у свою чергу, стимулює дослідження щодо створення нових методів та апаратних і програмних засобів моделювання і обробки даних в системах космічних досліджень і визначається чотирма взаємопов'язаними факторами:

- наявності великої кількості даних при постановці космічних експериментів;
- необхідності розв'язання задач реального часу, які не розв'язуються або вкрай незадовільно розв'язуються іншими засобами;
- насущними потребами розвитку сучасних засобів обробки інформації, для яких властивий масовий паралелізм, мікромініатюризація та наявність елементів штучного інтелекту;
- потребами вивчення природних механізмів мислення.

Особливістю даного напрямку робіт є те, що, з однієї сторони, для ефективного використання нових обчислювальних структур необхідним є як ґрунтовний теоретичний аналіз їх роботи, так і потужний інструментарій програмних та апаратних засобів для розв'язання на них задач різного класу. З другої сторони, актуальною є розробка нових засобів навчання самоорганізовуваних систем для побудови нейронних мереж на базі нових технологій.

На даний час для розвитку нових інформаційних технологій, моделювання та синтезу обчислювальних систем проводяться інтенсивні теоретичні і прикладні дослідження як в нашій країні, так і за її межами. В них значна увага надається теоретичним аспектам функціонування і моделювання обчислювальних структур та розпаралелювання алгоритмів на них. Ці підходи значною мірою лягли в основу концепції обчислювальних машин п'ятого покоління.

В роботах Б. М. Олексіва, Б. В. Киселя, Ю. В. Олотака розглядається багатопроекторна обчислювальна система типу нейронних мереж, що складається з матриць однорідних процесорів. Для програмування таких систем була розроблена мова програмування високого рівня FPL [75].

Авторами розроблено метод та інструментальні засоби розпаралелювання алгоритмів в багатопроекторних нейроподібних системах на основі запропонованого опису властивостей потоків даних. Встановлено принцип неперервності потоків даних, який застосовується для побудови та аналізу ЯПФ представлення алгоритму. Встановлено умови залучення потоку в операцію на заданому рівні ЯПФ. Розпаралелювання алгоритмів, що при цьому досягається, відповідає абсолютно-максимальному розпаралелюванню. Описано розроблений алгоритм на-

лаштування багатопроекторних систем типу однорідних обчислювальних середовищ з елементами оптимізації, яку доцільно використовувати при обмеженій ширині налаштовуваного обчислювача.

Високопродуктивні нейронні мережі для обробки даних в системах космічних досліджень. Для розв'язку задач обробки швидкопоступаючих даних в постановці космічних експериментів у ряді випадків, з однієї сторони, необхідна надвисока швидкодія обчислювальних структур, наприклад для розв'язку задач управління. З другої сторони, є ряд задач, які важко піддаються формалізації і побудові конструктивних алгоритмів. Здебільшого у таких випадках використовують евристичні підходи. До таких проблем відносяться обробка та розпізнавання зображень, задачі дистанційного зондування, прогнозування складних багатовимірних процесів та ін. З метою розв'язку таких задач у постановці космічних експериментів пропонуються потужні нейронні мережі.

Серед великої кількості розроблених парадигм штучних нейронних мереж (ШНМ) лише декотрі набули практичного застосування. Найбільш універсальними серед таких вважаються ШНМ типу Feed Forward Back Propagation, оскільки саме з їх допомогою знайшла своє рішення найдовша низка прикладних задач. Відомі також і суттєві недоліки мереж даного типу, серед яких повільність навчання вважається основною проблемою, що обмежує можливості нейрокомп'ютигу.

Р. О. Ткаченко [154] вперше запропонована нова концептуальна модель нейромереж, що стала основою нових підходів до побудови ШНМ та їх навчання. В рамках запропонованої моделі описуються і реалізуються алгоритми швидкого навчання мереж Feed Forward класичного типу, разом з тим на її основі можливо синтезувати ШНМ нових типів, що мають нові властивості, які дозволяють розширити сферу застосування останніх в системах космічних досліджень.

Основою моделі є представлення навченої нейромережі функціоналом від аргументних функцій — множини функцій синаптичних ваг, множини перехідних функцій та функцій вхідних сигналів. Кожному з наборів відповідей вектор вихідних сигналів. Задача навчання ШНМ в такій постановці зводиться до синтезу множин функцій синаптичних ваг та множин перехідних функцій, для яких числові значення функціоналу з достатньою точністю наближаються до координат-відгуків точок навчальної поверхні. Спосіб апроксимації навчальної поверхні (послідовність кроків і типи вибраних залежностей) визначає структуру мережі та основні її властивості.

Найближчим до традиційних є варіант мереж Feed Forward з використанням лише проєктивних зв'язків від нейронів наступного шару до попереднього. З метою покращення точності, перехідні функції нейронів схованих шарів можуть вибиратися поліноміальними, використовуватися каскадні з'єднання «неповних» мереж.

На основі даної моделі будуються і нові структури ШНМ, що не мають аналогів серед існуючих парадигм. Серед них відзначимо тришарову структуру, що передбачає існування додаткових латеральних зв'язків між нейронами схованого шару. Навчання даних мереж, як і в попередньому випадку, неітеративне. Суттєвою властивістю останніх є здатність одночасно з продукуванням вихідних сигналів отримувати оцінку (прогноз) точності.

Більшість запропонованих варіантів ШНМ та алгоритмів їх навчання пройшла ретельну перевірку для задач, що стосуються різних проблемних галузей. Отримані результати таких досліджень підтвердили правильність використовуваних підходів та допомогли виділити напрямки можливого застосування, що найкраще відповідають можливостям даних нейромереж:

- обробка даних дистанційного зондування Землі;

- обробка космічних зображень в реальному часі;
- прогнозування сонячно-земних залежностей;
- захист і відтворення даних;
- задачі наближення та відтворення функціональних залежностей багатьох змінних. Отримувана якість розв'язання подібних задач значно перевищує можливості регресійних моделей, затрати часу при цьому мінімальні і йдуть лише на підготовку вхідних масивів даних для навчання. ШНМ, що використовуються в даному режимі, можуть розглядатись як універсальний засіб моделювання складних багатопараметричних процесів;
- прогнозування багатовимірних процесів з можливістю швидкого перенавчання (донавчання) в міру появи нових даних;
- нелінійний факторний та кластерний аналіз. Ступінь допустимих нелінійних деформацій початкового простору задається. Інтерпретація діючих основних факторів виконується в околі певних галузей;
- візуалізація багатопараметричних процесів в просторі двох домінуючих факторів розглядається як розвиток попередньої задачі. Може стати основою систем діагностики, моніторингу, оптимізації.

Розроблені віртуальні ШНМ допускають можливість сумісного використання, каскадування для вирішення комплексних проблем.

Швидкість навчання подібних нейромереж вища від показників різних модифікацій Back Propagation на 2–3 порядки при суттєво кращих показниках за точністю. Більшість задач достатньо великої розмірності розв'язується на персональних комп'ютерах. Розробка спеціалізованих процесорів на основі паралельно-потоківих структур з використанням табличної обробки інформації дозволить в перспективі перейти до розв'язання складніших проблем, що не під силу сучасним потужним нейрокомп'ютерам.

Р. О. Ткаченко і його учнями розвинуто принципово новий підхід до розв'язку задач, які не піддаються математичній формалізації. Аналогів за високою швидкістю навчання запропонованих нейромереж у світовій практиці немає. Важливість цього підходу для обробки космічних даних є дуже вагома, оскільки у ряді окреслених вище задач вхідні і вихідні дані, що характеризують складні процеси у космічному просторі, можуть бути цінною інформацією для навчання нейромереж з метою розв'язку задач програмування складних процесів. Використовуючи цей підхід, К. С. Войчишиним і Р. О. Ткаченко вперше отримані цікаві результати з прогнозування сонячної активності, які відкривають зовсім нові можливості у вивченні та дослідженні космічних глибин.

3. ВИСОКОЕФЕКТИВНІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ І ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ НА КЛІТКОВИХ НЕЙРОМЕРЕЖАХ

Найважливіші задачі при обробці космічних зображень — фільтрація шуму (зокрема, боротьба зі спекл-шумом на радіолокаційних зображеннях) та виділення дрібних деталей. Застосування нейромережних технологій для розв'язку цих задач — природна вимога часу. Кліткові нейромережі (CNN) є відмінним апаратом для розв'язування різних задач обробки і розпізнавання космічних зображень. Н. Н. Айзенбергом і І. Н. Айзенбергом [28, 29, 116–123] проведені дослідження з реалізації ряду оригінальних алгоритмів обробки космічних зображень на кліткових нейромережах (CNN), а також розроблені високоефективні нейросистеми. Розглядаються класичні кліткові нейромережі, а також кліткові нейромережі з багатозначних і універсальних нейроелементів. CNN — це двовимірний масив нейроелементів розмірності $N \times M$. Кожен нейрон в

такій мережі з'єднаний тільки з нейронами зі свого найближчого (пхт) околу. Така конструкція мережі дуже зручна для реалізації алгоритмів фільтрації в просторовій області. Існує низка подібних застосувань неперервних CNN (CCNN) [29]. Дискретні CNN (DTCNN), орієнтовані на розв'язування задач обробки зображень, які описуються з допомогою булевих порогових функцій. Розглядаються CNN з додатковою можливістю реалізації нелінійних методів обробки, пов'язаних з обчисленням локальних гістограм (це зручно насамперед в плані реалізації рангових і медіанних фільтрів). Функціональні можливості CNN, порівняно з класичними CNN і їх модифікаціями, були суттєво розширені шляхом використання як базових нових типів нейронів. Алгоритми, які описуються за допомогою неперервних булевих функцій, не можуть бути реалізовані на DTCNN, але їх можна реалізувати на CNN з універсальних логічних елементів (універсальних булевих нейронів) — CNN-UBN. CNN на багатозначних нейронах (CNN-MVN) є відмінним засобом для реалізації багатозначних нелінійних фільтрів (MVF). MVF ефективні для фільтрації гаусового, рівномірного і навіть спекл-шумів, а також для підсилення високих і середніх частот (з метою виділення деталей). Для вирішення останньої задачі поки що не в повному обсязі використані можливості застосування медіанних фільтрів для розв'язування задач корекції частот.

Детально розглянуті такі проблеми: структура та види CNN, оригінальні алгоритми точного глобального виділення контурів і виділення контурів по вузьких напрямках багатозначних нелінійних фільтрів. Їх застосування для фільтрації шуму і вирішення задач корекції частот (виділення деталей), застосування для розв'язування задач корекції частот медіанного типу фільтрів і реалізацію всіх алгоритмів на CNN.

Досліджено ряд оригінальних нелінійних фільтрів, їх застосування для фільтрації шуму та корекції частот. Н. Н. Айзенбергом і І. Н. Айзенбергом запропоновані алгоритми глобального точного виділення контурів і виділення контурів по вузьких напрямках. Описані алгоритми реалізуються на кліткових нейромережах. На цій базі І. Н. Айзенбергом розв'язано ряд задач обробки космічних зображень.

4. СИСТОЛІЧНІ АЛГОРИТМИ ТА БОРТОВІ СТРУКТУРИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

При розробці бортових вимірювальних систем аерокосмічних апаратів значна увага приділяється проблемі швидкої обробки сигналів та зображень. Дана проблема в основному зводиться до побудови високоефективних паралельних алгоритмів розв'язання одновимірної та двовимірної задач цифрової фільтрації.

На основі оптимізації за швидкістю відомих систолічних алгоритмів реалізації одновимірної згортки та систолічного алгоритму реалізації рекурсивного фільтра в роботах В. О. Вальковського і його учнів запропоновані більш ефективні алгоритми і відповідні систолічні структури для розв'язання одновимірної задач цифрової фільтрації. Недоліком відомих алгоритмів є наявність значної кількості затримок потоків даних. В проведених роботах реалізована ідея досягнення мінімальної системної затримки за рахунок відмови від повної локальності міжпроцесорних зв'язків. Ця розробка знайшла своє практичне втілення в запропонованому квазісистолічному алгоритмі розв'язання задачі шифрованої фільтрації за одновимірною схемою. Доведено, що він є оптимальним за швидкістю та використанням пам'яті в класі еквівалентних йому за інформаційним графом алгоритмів. Причому вибрано такий інформаційний граф, який забезпечує найкращу збіжність алгоритму. Наведені порівняльні оцінки прискорення обчислень для еквівалентних алгоритмів: послідовного алгоритму; алгоритму, побу-

дованого на основі методу гіперплощин Лемпорта; квазісистоличного алгоритму. З практичної точки зору значний інтерес викликає проблема порівняння наведених в згаданій роботі алгоритмів розв'язання задачі цифрової фільтрації, які мають різні графі інформаційної залежності: синхронного паралельного алгоритму, квазісистоличного алгоритму і алгоритму з організацією асинхронних обчислень.

Запропонована в роботі [43] методика побудови оптимального алгоритму розв'язання одновимірної задачі цифрової фільтрації використана при розробці квазісистоличного алгоритму розв'язання двовимірної задачі цифрової фільтрації. Слід зазначити, що згадану задачу можна розглядати як «джерело» нових методів організації обробки в деяких обчислювальних системах, наприклад, в нейронних мережах.

Встановлено взаємозв'язок між задачею цифрової фільтрації і нейронними мережами. Зокрема, пропонується використовувати як прототип структури нейронної мережі алгоритм і квазісистоличну систему для розв'язання задачі цифрової фільтрації у двовимірному випадку. Алгоритм орієнтований на обчислення зваженої функції згладжування в плаваючому вікні розміром $(2m + 1) \times (2n + 1)$. Система працює таким чином, що при перерахунку значення на k -тому рівні використовується $2mn + m + n$ значень з k -го рівня — вже перераховані елементи, і стільки ж значень з $k - 1$ рівня — ще не перераховані елементи. Час спрацювання системи рівний довжині максимально критичного шляху в інформаційному графі при даному режимі обробки, тобто є незменшуваним.

Досліджено [43] тривимірну нейронну мережу, структура з'єднань в якій відповідає структурі інформаційних зв'язків в описаному вище плаваючому вікні. Якщо функція активації елемента нейронної мережі збігається з функцією підрахунку задачі цифрової фільтрації, то нейронна мережа розв'язує задачу цифрової фільтрації з навчанням, тобто з модифікацією вагових коефіцієнтів. Це приклад перенесення механізмів обробки інформації в одну сторону — від нейронних мереж до задач цифрової фільтрації. Якщо ж в розробленій схемі нейронної мережі допустити незначну модифікацію функції активації, наприклад, ввести порівняння її значення з деяким порогом, то маємо перенос в другу сторону — від задач цифрової фільтрації до нейронних мереж. Розроблена квазісистолична система перетворюється в систему, що реалізує тривимірну нейронну мережу з достатньо розповсюдженою структурою зв'язків і найбільш використовуваною функцією активації. Очевидно, що такі системи найкращим чином відповідають «плоским» задачам типу обробки складних космічних зображень, задачі розпізнавання двовимірних образів і т.д.

5. НАДВИСОКА РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ОБРОБКИ КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ, ОБ'ЄКТІВ, ШВИДКОПІЛІННИХ ПРОЦЕСІВ НА ПКС

Створення на орбіті Землі довготривалої ОКС ставить низку фундаментальних задач. В першу чергу — це використання космосу для потреб людства. Друге — це задачі позаатмосферної астрономії та астрофізики. І третє — проблеми, пов'язані з реалізацією довготривалого пілотованого міжпланетного польоту до інших планет.

Всі ці задачі потребують проведення широкого спектра наукових досліджень безпосередньо на борту ОКС [115].

Для розв'язку задач моніторингу Землі, астрофізики, позаатмосферної астрономії, мікробіології, медицини, космічної навігації і т. д. розроблено новий високоефективний інструментарій — інформаційний відеоскоп, який підвищує роздільну здатність сприймання відеозображень, дозволяє уникати різноманітних завад, які спричиняє атмосфера і земні умови.

Високі технічні характеристики інформаційного відеоскопа, що пропонується, досягаються завдяки втіленню технології програмно-керованих растрів, коли траєкторія електронного променя, який зчитує інформацію з мішені приймальної трубки, задається програмно з керуючого комп'ютера. Зчитування інформації з мішені виконується в старт-стопному режимі, що дає можливість зчитувати інформацію з роздільною здатністю більшою ніж площа електронного променя, який її зчитує.

Наземні випробування створеної телевізійної системи підтвердили її високі метрологічні характеристики. Запропонований підхід надає добру перспективу для створення широкого спектра бортових космічних приладів та систем як для наукових досліджень так і для цілей космічної навігації.

На базі інформаційного відеоскопа планується розробити цілий спектр приладів та систем для наукових досліджень на борту ОКС в різних галузях наукових досліджень.

В залежності від оптичного приладу, який буде стикуватись з спеціалізованою телевізійною камерою інформаційного відеоскопа, він може виступати в ролі комп'ютерного телескопа, мікроскопа, фотоапарата або відеомагнітофона. З високою роздільною здатністю космонавт-дослідник зможе проводити наукові дослідження в галузях позаатмосферної астрономії, астрофізики, мікробіології, медицини, проводити моніторинг поверхні земної кулі, використовувати відеоскоп в космічній навігації.

Зміна системи керування та давачів відеоскопа дасть можливість створити на борту ОКС прилади для досліджень зображень іншої неоптичної фізичної природи. До таких приладів можна віднести створення на борту ОКС електронного, тунельного та фотоакустичного мікроскопа, томографа, тепловізора.

6. АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ СКЛАДНОСТРУКТУРОВАНІХ КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Б. П. Русином запропоновано та розвинуто методи та засоби синтезу, обробки та розпізнавання складноструктурованих космічних зображень різної фізичної природи, які полягають в застосуванні нових підходів до синтезу енергетичних характеристик тривимірних об'єктів і попередньої обробки напівтонових малокоонтрастних зображень, а також нові способи формування систем інваріантних до афінних перетворень ознак для опису і розпізнавання малорозмірних і великорозмірних, рухомих і нерухомих об'єктів. В рамках цього наукового напрямку отримані такі основні результати [108]:

- розроблено модель формування напівтонових зображень тривимірних об'єктів, яка дозволяє відтворювати якісні зображення без безпосереднього використання оптичної системи. На основі моделі розроблено алгоритм кадрування зображень динамічних просторових сцен;
- для інформаційних адаптивних моделей динамічних просторових сцен розроблено новий клас методів попередньої обробки та розпізнавання складноструктурованих космічних зображень. Серед них:
 - метод придушення шумів і завад для точного виділення контура малорозмірних динамічних об'єктів;
 - методи вибору порога для переводу напівтонових зображень в бінарні на основі обчислень зміни ентропії матриці зображення;
 - метод формування систем ознак для опису і розпізнавання тривимірних об'єктів шляхом визначення для кожного ракурсу об'єкта функції кривизни контурів і відповідних їм векторів-маркерів;
 - метод розпізнавання рухомих малорозмірних об'єктів на основі використання ефекту Доплера для побудови

амплітудних і частотних портретів об'єктів на базі одержаних аналітичних виразів для їх спектрів;

- розроблено:
 - паралельний метод геометричних перетворень космічних зображень, який дозволяє розглядати їх як одну операцію перетворення координат. Створено алгоритм та програмне забезпечення, яке має суттєві переваги порівняно з широковідомим пакетом Photoshop;
- розроблена нова архітектура побудови бортових високопродуктивних спеціалізованих процесорів, інформативно-обчислювального комплексу для обробки і розпізнавання в реальному часі складноструктурованих космічних зображень різної фізичної природи для космічних досліджень при обробці великих масивів даних.

7. ВІДКРИТІ СИСТЕМИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ

ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ НА БОРТУ ПІЛОТОВАНИХ КОСМІЧНИХ СТАНЦІЙ

У роботах А. Е. Батюка, І. І. Кравця, Ю. В. Опотяка [70, 71, 75] та ін. проведені дослідження, пов'язані із створенням бортової відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації, яка допускає масштабованість та нарощуваність з метою інформаційного забезпечення на борту пілотованих космічних станцій (ПКС) та у центрах керування. Концепція системи передбачає забезпечення постійного відбору, обробки та накопичення інформації від визначених вузлів і систем ПКС, у випадку необхідності — застосування для інформаційного забезпечення різноманітних наукових експериментів, що проводяться на борту ПКС, а у аварійних ситуаціях — можливість оперативного розгортання протягом декількох годин.

Концепція запропонованої системи має такі основні переваги:

- універсальність апаратних та програмних засобів системи для організації відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації на борту ПКС;
- відкритість архітектури системи, що передбачає можливість поетапного розгортання системи в найкоротші терміни, а при необхідності — встановлення на діючому обладнанні ПКС;
- представлення отримуваної інформації в реальному часі та у зручному для користувача вигляді (інформація, прив'язана до мнемосхем технологічних процесів ПКС та експериментів; графіки параметрів);
- підтримка системою бортової локальної мережі передачі даних та відповідних протоколів, що забезпечує отримання інформації одночасно широким колом користувачів за різноманітною тематикою та у відповідності до їх прав доступу;
- отримувана такою системою інформація дозволить виявляти певні закономірності між різноманітними вимірюваними параметрами, проводити їх кількісну і якісну оцінку та прогнозувати стан досліджуваних процесів у космічних глибинах.

Використання запропонованої архітектури відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації та її реалізація на борту пілотованої космічної станції дозволить створити інтегровану інформаційну мережу. Розгортання такої системи може проводитись поетапно і охопити у випадку необхідності усі визначені вузли та системи ПКС.

Ця система має перспективу широкого застосування для постановки найрізноманітніших експериментів на борту ПКС, є гнучкою і ефективною. Вона пройшла апробацію у постановці наземних експериментів та впровадженні.

8. ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ОБ'ЄМУ СИГНАЛУ, КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

У працях Б. О. Попова проведено фундаментальні та прикладні дослідження спрямовані на компактне та ефективне представлення складних фізичних процесів, природних явищ, об'єктів, структур, розрахунків і синтез бортових спеціалізованих та проблемно-орієнтованих високопродуктивних обчислювальних пристроїв, розробку ефективного математичного забезпечення та ефективного здійснення на цій основі математичного моделювання. Мета цих розробок — зменшення об'єму сигналу і компактного представлення різних процесів у космічних дослідженнях.

Вперше встановлено загальні властивості рівномірного (з однаковою максимальною похибкою на кожній ланці) наближення аналітичних функцій раціональними сплайнами [100, 101, 103, 106, 107, 151–153].

Порівняння точності рівномірного наближення чебишовськими сплайнами із рівномірним наближенням відрізками ряду Тейлора, ермітовими сплайнами, Паде-сплайнами показало значний вииграш за точністю при використанні чебишовських сплайнів із тією ж кількістю ланок та вииграш у кількості ланок при однаковій точності наближення.

Вперше Б. О. Поповим запропоновано конструктивні обчислювальні алгоритми для визначення параметрів рівномірного наближення сплайнами. Для аналітично заданих функцій такі алгоритми будуються на основі виразів для похибок рівномірного наближення. При цьому для знаходження границі i -ї ланки сплайна необхідно розв'язати лише одне трансцендентне рівняння з однією невідомою. Пропоновані раніше алгоритми вимагали розв'язування систем десятків трансцендентних рівнянь із багатьма невідомими. При цьому не існувало ефективних методів розв'язання таких рівнянь.

Досліджено загальні властивості найкращих чебишовських нелінійних наближень, побудовано відповідні обчислювальні алгоритми [104, 105].

Зазначені, а також деякі інші результати в працях Б. О. Попова, дали можливість побудувати нові ефективні алгоритми обчислення елементарних спеціальних функцій [102, 103, 105]. Особливо корисні розроблені алгоритми при побудові спеціалізованих табличних процесорів із нерівними інтервалами, призначені для обчислень аналітичних функцій у високопродуктивних бортових спеціалізованих та проблемно-орієнтованих процесорах. У спецпроцесорах використовуються методи розпаралелювання обчислень, які висвітлені у шкільній праці, та обчислення за допомогою рівномірного наближення раціональними та многочленними чебишовськими сплайнами. Показано переваги використання таких наближень у порівнянні із раніше відомими методами.

Вперше розглянуто чебишовські сплайни спеціальних видів, використання яких істотно спрощує реалізацію і синтез широкого класу бортових технічних пристроїв.

Значна частина запропонованих методів та алгоритмів відноситься до паралельно-последовного типу, що забезпечує можливість широкого розпаралелювання процесу при знаходженні параметрів наближень. Розвинуті методологічні основи розв'язування розглянутих задач на машинах наступних поколінь, що базуються на багатопроцесорних ЕОМ з глибоким ступенем розпаралелювання алгоритмів обробки даних для обробки великих масивів швидкопоступаючої інформації у бортових системах. Передбачено також можливість реалізації ефективних алгоритмів при можливості проведення символічних перетворень на ЕОМ [101–103, 105, 153].

Запропоновані методи істотно підвищують якість і ефективність опису складних процесів, об'єктів, структур, ситуацій,

створення математичного забезпечення, полегшують синтез інформаційно-вимірювальної та обчислювальної техніки, систем передачі та перетворення інформації для постановки експериментів на ПКС.

Розроблене програмне та математичне забезпечення може використовуватися при проектуванні і створенні нових систем перетворення і передачі сигналів, приладів та пристроїв обчислювальної та інформативно-вимірювальної техніки.

Теоретичні та прикладні результати Б. О. Попова отримали світове визнання.

Розроблені комплекси програм широко впроваджені через Український республіканський фонд алгоритмів, програм у 143 організаціях колишнього СРСР. Вони використовувались при проектуванні і синтезі ряду пристроїв нової інформаційно-вимірювальної та обчислювальної техніки, систем автоматичного проектування та контролю, здійснення математичного моделювання складних процесів, ситуацій, об'єктів, структур, для космічних досліджень.

9. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАКОПТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ПРОЦЕСІВ НА БАЗІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У працях Р. А. Буня проведени фундаментальні та прикладні дослідження з інформаційних технологій діакоптичного моделювання динаміки складних фізичних процесів і природних явищ, об'єктів, структур на основі рівнянь вищих порядків [33, 126]. У цих працях запропоновано і розвинуто новий науковий напрям – створення інформаційних технологій, математичних методів та програмних засобів моделювання динаміки фізичних процесів і природних явищ на основі диференціальних рівнянь вищих порядків, які полягають у застосуванні нових підходів до формування моделей та нових числових способів розв'язування рівнянь вищих порядків без зведення їх до системи рівнянь першого порядку в нормальній формі [31, 32].

В рамках цього наукового напрямку отримано такі основні результати.

Показано, що існує широкий клас задач математичного моделювання (в космічних розробках, електротехніці, екології та інших областях), в яких моделі досліджуваних процесів чи явищ зручно представляти у вигляді звичайних диференціальних рівнянь з похідними вищих порядків з заданими початковими умовами. Для розв'язування задач моделювання перехідних процесів у складних нелінійних системах розроблено нові діакоптичні підходи до побудови математичної моделі у вигляді рівнянь вищих порядків [124, 125].

На основі запропонованих підходів до математичного моделювання динаміки складних фізичних процесів і явищ з використанням диференціальних рівнянь вищих порядків розроблено алгоритми та програмні засоби для побудови моделей та їх числового розв'язування [127].

Розвинуті Р. А. Бунем та його учнями діакоптичні підходи до формування моделей та розроблені числові методи для рівнянь вищих порядків використано для розв'язування задач екології на базі дистанційного зондування Землі. В цьому напрямку розроблено діакоптичний підхід до моделювання глобального кругообігу вуглецю в біосфері, який базується на розбитті планети на ряд регіонів і описі кожного з них своєю математичною моделлю та враховується зв'язок сусідніх регіонів через атмосферу [33]. Запропонований підхід розширює область адекватності моделі, дає можливість враховувати неоднорідність протікання біохімічних процесів у різних регіонах планети, здійснювати імітаційне моделювання: впливу екологічних катастроф в окремих регіонах на клімат планети; результатів керованого і некерованого антропогенних впливів на природу; впливу на процеси кругообігу вуглецю таких факто-

рів як зміна площ сільськогосподарських угідь, вирубування лісів, лісові пожежі, меліоративні роботи та ін.

Запропоновано та обґрунтовано процедуру формування регіональної математичної моделі кругообігу вуглецю, яка базується на розбитті кожного регіону на ряд трав'яних і лісових підсистем та враховує потоки вуглецю між окремими блоками цих підсистем. При цьому суттєво спрощується процедура визначення параметрів протікання біохімічних процесів. В модель входять блоки, які відображають антропогенні і неантропогенні викиди вуглецю в атмосферу, а також потоки вуглецю із сусідніх регіонів та дані дистанційного зондування Землі.

Розроблено метод формування математичної моделі глобального кругообігу вуглецю на основі регіональних моделей та рівнянь зв'язку, які відображають взаємний зв'язок сусідніх регіонів через атмосферу. При формуванні рівнянь зв'язку використовуються дані про «розу вітрів» в точках межі поділу регіонів.

Для регіональних моделей кругообігу вуглецю проаналізовано та обґрунтовано вибір аналітичних виразів для опису потоків вуглецю між окремими блоками в системі «атмосфера – рослина – ґрунт».

Для числового розв'язування рівнянь моделі запропоновано алгоритм, який враховує суттєві відмінності в швидкостях протікання окремих складових процесу кругообігу вуглецю.

Створено програмні засоби та здійснено імітаційне моделювання кругообігу вуглецю для окремого регіону, досліджено динаміку зміни вмісту вуглекислого газу в атмосфері, спричинену як його раптовим, так і постійними викидами, а також досліджено сезонну залежність величини фотосинтезу та продуктивності рослин з врахуванням зміни температури, освітленості та концентрації вуглекислого газу в повітрі.

Розроблені інформаційні технології, математичні методи та комп'ютерні алгоритми діакоптичного моделювання дають можливість формувати моделі динамічних процесів у вигляді рівнянь вищих порядків і розв'язувати їх без зведення до системи першого порядку більшої розмірності, а тим самим вони зменшують обсяги обчислювальних затрат, спрощують процес числового моделювання і роблять його результати більш наочними.

10. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Дедалі більші обсяги унікальних, добутих на ПКС, даних про сонячну активність та її вплив на довкілля Землі сьогодні ще не можуть бути піддані ефективному оперативному аналізу, орієнтованому на практичне застосування результатів, через відсутність необхідних бортових високопродуктивних спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем. Якщо в подальшому, «на землі» в стаціонарних умовах, в структурі цих даних і вдається виявити і розпізнати діагностично-прогностичну інформативність, її актуальність для багатьох задач практики безповоротно втрачається.

Побудова спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем, які працювали б на борту ПКС в близьких до реального часу режимах, гальмується неадекватністю наявного математичного апарату і відповідною йому алгоритмічно-програмною забезпеченням для ефективного опису і аналізу даних з циклічно-неоднорідною просторово-часовою структурою, якими є у більшості випадків геліо-геофізичні дані. Сюди відносяться, зокрема, щодобові значення даних про рекурентну фотосферно-корональну активність Сонця з їх високою діагностично-прогностичною інформативністю, Кр і Ар – індекси рекурентної активності магнітосфери, а також середньомісячні та щодобові значення числа Вольфа.

К. С. Войчишиним і його учнями проведені фундаментальні дослідження з розробки інформаційних технологій прогнозування сонячної активності і на цій основі створені програмні засоби обробки і аналізу рекурентної фотосферно-корональної активності Сонця і відповідної їй іоносферно-магнітосферної активності для проведення діагностики і прогнозування довкілля ПКС і Землі [46–49, 158, 159].

Створені на базі математичних моделей [48, 49, 158, 159] циклічно-неоднорідної просторово-часової структури індексів сонячної активності і реалізовані в бортові інформаційно-аналітичні системи обробки даних математичні та алгоритмічно-програмні засоби дозволяють:

- виявляти в реальному часі в даних, що надійшли на борт ПКС фундаментальні закономірності зв'язку параметрів циклічності сонячної активності;
- підвищувати ефективність методів прогнозування індексів сонячної активності з малою (до одного місяця) і надвеликою (до одинадцяти і більше років);
- досліджувати фундаментальні закономірності сонячно-магнітосферної активності для виділення геоактивної компоненти числа Вольфа в широкому діапазоні розділення його структури;
- розробляти засоби обробки геліогеофізичних даних для розкриття фундаментальних закономірностей в структурі сонячно-земних зв'язків.

Створені в рамках запропонованого підходу засоби обробки та аналізу даних принципово відрізнятимуться від відомих спектрально-кореляційних засобів аналізу для стаціонарних і періодично нестаціонарних сигналів тим, що вони будуть адекватні циклічно-нестационарним сигналам), де повторюваність міститься в збереженні форми послідовних циклів з, взагалі кажучи, неоднаковою їх тривалістю, висотою та асиметрією.

II. ЛЮДИНО-МАШИНИЙ ІНТЕРФЕЙС НА ПЛОТОВАНИХ КОСМІЧНИХ СТАНЦІЯХ

Проведені у цьому напрямку наукові теоретично-експериментальні дослідження мали своєю основною метою створити ефективну математичну базу для розробки загальних та спеціальних рекомендацій в організації операторської діяльності та робочого середовища в людино-машинному інтерфейсі систем обробки візуальної інформації та систем управління складними процесами на ПКС. В цьому плані людино-машинний інтерфейс, як цілісна система, розглядається в просторі науково обґрунтованих заходів організаційного забезпечення високоефективної і продуктивної діяльності людини-оператора (космонавта). Об'єктом дослідження є власне діяльність космонавта в процесі обробки зорової інформації, точніше розпізнавання складних образів. В загальному, суть досліджень полягає в тому, щоб, з однієї сторони, не прив'язуючись до конкретного типу чи виду людино-машинного інтерфейсу створити загальну методологію з ґрунтовною математичною основою для організації такого роду досліджень і проектування таких систем. З другої сторони, дана проблема є однією з основних проблем математичної психології – математичного моделювання категорії діяльності та аналізу моделей і також вимагає невідкладного розв'язання.

Р. М. Камінським проведені дослідження в результаті яких створені:

- математичні моделі процесів сприйняття, обробки та вироблення рішень при розпізнаванні складних швидкозмінних зображень:
 - а) математична модель в класі рекурсивних функцій процесу розпізнавання ситуацій, які пред'являють операторові

у формі зображень на інформаційному полі уваги, при цьому термальне представлення враховує, з однієї сторони, довільність процесу сприйняття, а з другої – його рекурсивність [52];

б) математичні моделі – інформаційна (вхідної інформації), еталонна (досвіду і предметних знань) та концептуальна (результуюча їх взаємодії), які визначають гомоморфне відображення процесу розпізнавання вхідної інформації [63];

- математичні моделі оператора-космонавта:
 - а) часова модель в класі імпульсних потоків, яка відображає діяльність оператора трьома послідовностями прямокутних імпульсів синхронізованих по фронту – перша відповідає пред'явлюваній послідовності зображень, друга – лише послідовності зображень з об'єктами заданого класу, а третя відображає час розпізнавання визначених об'єктів як тривалість імпульсів, ця модель використовується при описі діяльності оператора в задачах узгодження вхідних інформаційних потоків [65];
 - б) модель у формі трикомпонентного часового ряду характеризує динаміку часу розпізнавання та вплив на неї функціонального стану оператора [65];
 - в) ймовірно-часова модель відображає взаємозв'язок між розподілом часу розпізнавання та його динамікою, що дозволяє представити діяльність оператора в часовому просторі, а також оцінити деякі її складові, наприклад оперативність прийняття рішення [144];
- встановлення виду закону розподілу часу розпізнавання складних зображень:
 - а) модель часу розпізнавання зображень у формі закону розподілу Вейбула отримана на основі порівняльного теоретичного аналізу експериментальних даних в інших відомих розподілах, які використовують в подібних дослідженнях [66];
- система інтегральних показників для оцінювання швидкодії оператора:
 - а) система показників оперативності на основі закону розподілу часу розпізнавання [68];
 - б) система показників оперативності, яка враховує динаміку часу розпізнавання протягом роботи оператора і дозволяє визначити його адаптаційні характеристики та ймовірність переходу критичного рівня, який визначає допустимість величини цього часу [146];
 - в) система показників оперативності персоналу в системі обробки інформації та управління [64];
- модель людино-машинного інтерфейсу системи управління складними технологіями:
 - а) базова системна модель людино-машинного інтерфейсу управління складними процесами, яка виділяє основні загальні елементи реальної системи керування, відношення між ними та допускає введення нових елементів з своїми відношеннями між ними [134];
- моделі вхідної інформації:
 - а) алгоритми побудови і моделі тестових зображень з заданими характеристиками, створюваних випадковими процесами, для дослідження процесів сприйняття і обробки зорової інформації в системах розпізнавання складних образів [67];
 - б) математичні моделі зображень бінарних об'єктів в умовах впливу імпульсного шуму з різними законами розподілу [146].

Ці результати можна розглядати як математичну базу для створення людино-машинного інтерфейсу на довготривалих плотованих космічних станціях.

12. ЗАСОБИ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ВІДБОРУ, ОБРОБКИ, ПЕРЕДАЧІ І ЗБЕРЕЖЕННЯ ДАНИХ, ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ: ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ, СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОЦЕСОРИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Вченими Західного наукового центру розроблені високоефективні спеціалізовані і проблемно-орієнтовані інформаційно-вимірювальні системи, нейророботні системні середовища та програмні комплекси, а також локальні і регіональні комп'ютерні мережі, які знайшли широке використання для відбору, передачі, обробки та зберігання інформації в космічних дослідженнях.

Під керівництвом Р. Ф. Федоріва створено фотометри та комплекс фотометричних систем відбору та обробки інформації [4, 7, 21, 23, 24].

- електрофотометр ОФ-1Л, призначений для досліджень будови речовини методами комбінованого розсіювання світла;
- імпульсні фотометри ІФ-2Л та ІФД-1Л для імпульсної лазерної фотометрії, причому ІФД-1Л працює при особливо слабкому сигналі (наприклад, розсіювання світла на світлі);
- астроелектрофотометри АЕФ-1Л та АЕФ-2Л, призначені для реєстрації світлових образів штучних небесних тіл на фоні розсіяного світла нічного неба.

Розроблено генератори інформаційних сигналів із зразковими числовими характеристиками для метрологічного забезпечення створених інформаційно-вимірювальних систем. Генератор «Десна-5» випускається серійно.

Запропоновані В. О. Погрібним методи високопродуктивної адаптивної цифрової обробки одно- та двовимірних випадкових сигналів в реальному часі на підставі дельта-модуляції використано для створення та впровадження принципово нових систем обробки даних [2, 3, 5, 12–15, 18, 19, 25–27]:

- льотних візрів інформаційно-вимірювальних систем «Терра-1», «Терра-2», цифрової телеметричної системи АКПКР, частотних телеметричних систем СОРИ-1 та СОРИ-2, дискретної вимірювальної системи енергії часток ДИСЭЧ, які використовувалися в міжнародних стратосферних експериментах серії САМБО;
- модифікованої цифрової телеметричної системи АКПКР-М для вимірювання параметрів ДНЧ-випромінювань магнітосфери в експедиційних умовах;
- дискретної телевимірювальної системи ДТИС та паралельного спектроаналізатора БПС-8, які використовувалися в ракетних експериментах;
- бортової цифрової телеметричної системи з деагломеруванням службових слів та слів синхронізації МАК для міжнародного космічного експерименту «Интербол»;
- частотної телеметричної системи з підвищеною лінійністю перетворення та збільшеною девіацією частоти БПЧ-Л та корелятора з лінійною дельта-модуляцією ЭКВ-2, які застосовувалися в космічному експерименті «Ионозонд-Э»;
- блоку адаптивних автокореляторів та кроскореляторів із знаковою дельта-модуляцією БК ДЭП-2 для міжнародного космічного плазмового експерименту АПЭКС;
- блоку цифрової пам'яті та комутатора БЦПК системи Парсек-А та блоку цифрових фільтрів ЦФ-1 для пілотованих космічних польотів;
- кореляційної системи АККОР для космічного експерименту «Активний»;
- спеціального процесора для обробки імпульсних сигналів детектора потоків енергійних часток СТЕП-Е, призначеного для міжнародного космічного експерименту «Попередження» з метою дослідження магнітосфери Землі в періоди сейсмаактивності і прогнозування землетрусів.

В розробці кореляторів БК ДЭП-2 використано адаптивний

метод відбору локально-стаціонарних інтервалів реалізації сигналів та алгоритм з дельта-модуляцією. У кореляторі ЭВК-2 дельта-модуляція використана для ефективного пригнічення імпульсних завад. Вона застосована також в цифровому фільтрі з рециркуляцією добутоків згорток в одному з каналів спектроаналізатора БПС-8. Методи вимірювання інтегральних та диференціальних енергетичних спектрів та виявлення мікросплесків і бухт інтенсивностей випадкових імпульсних послідовностей використано при реалізації систем ДИСЭЧ, ДТИС, СТЕП-Е. Запропоновано методи підвищення пропускну здатності, завадостійкості та надійності роботи використано в цифрових системах АКПКР, ДТИС, МАК та БЦПК, а в частотних телеметричних системах СОРИ і БПЧЛ — методи суттєвого покращення точності та розширення смуги вимірюваних сигналів.

З використанням створених приладів та систем вдалося вперше отримати нові відомості про магнітосферно-іоносферні зв'язки, вплив сонячного вітру на геофізичні процеси як результати — суттєвий економічний ефект.

Проведені прикладні дослідження у галузі високопродуктивної обробки даних стали основою для розробки та створення принципово нових бортових спеціалізованих та проблемно-орієнтованих систем обробки даних в реальному часі [6, 9–11, 16, 17, 20, 22].

В основі розроблених методів високопродуктивної паралельної обробки інформації створено принципово нові високоефективні обчислювальні структури для відбору, структурного розпізнавання і класифікації інформації про стан складних космічних систем, які на декілька порядків поліпшують ефективність обробки даних порівняно з існуючими. Ці системи призначені для постановки наукових експериментів та дистанційного зондування. Вони використовувалися при запуску великогабаритної космічної системи «Буран» та успішно працюють на космічних станціях типу «Мир».

- Спецпроцесори «Фільтр-1», «Фільтр-2», «Фільтр-3», «Фільтр-4», для обробки складних зображень, що надходять в режимі телевізійного тракту; їх функціональні можливості — фільтрація завад, виділення контурів, виділення окремих зображень.
- Проблемно-орієнтовані системи для управління лазерним променем за заданою функціональною розгорткою в реальному часі. Впроваджені для дослідження складних об'єктів.
- Спецпроцесор «Структура» для обробки зображень з метою їх розпізнавання в системах реального часу.
- Спецпроцесор для обробки великих масивів швидкопоступаючої інформації на космічних станціях типу «Мир».
- Проблемно-орієнтована система «Сігма» на базі системних середовищ. Впроваджена для створення бібліотеки мікропрограмних модулів при реалізації обчислювальних процесів з глибоким ступенем паралелізму обробки даних.
- ДПЮ впроваджені і були використані при запуску, супроводі та посадці космічної системи «Буран».
- Проблемно-орієнтована моніторна система для відбору, обробки, передачі та зберігання інформації про стан складних технологічних процесів, довкілля, оцінки середовищ.

Великий вклад у ці прикладні космічні розробки внесли Деркач Б. Т., Кисіль Б. В., Стрянець С. М., Опомяк Ю. В., Олексів Б. Я., Кожан В. П., Черчик Т. П., Паленичка Р. М., Русин Б. П., Батюк А. Е., Лушак А. Ю.

Запропоновані обчислювальні алгоритми для швидкої лічби елементарних і спеціальних функцій широко використовувалися при розробках комп'ютерного математичного забезпечення, мікропроцесорних систем, послужили базою для оптимального синтезу бортових проблемно-орієнтованих обчислювальних систем.

Діакоптичні підходи до моделювання кругообігу вуглецю в біосфері використано в геоінформаційній системі оцінки та прогнозу екологічного балансу Карпатського регіону.

На основі фундаментальних та прикладних досліджень щодо розробки інформаційної інфраструктури при Державному науково-дослідному інституті інформаційної інфраструктури створено науково-дослідний стенд для апробування високопродуктивних засобів відбору, обробки, передачі та збереження даних.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто шкіль праць, що охоплює дослідження та розробки напрямку інформаційних технологій і систем в інтересах космічних програм, що велися в Західному регіоні України і були спрямовані на виконання ряду державних науково-технічних програм колишнього Радянського Союзу, Державної науково-технічної програми «Перспективні інформаційні технології і системи» ДКНТПП України, міжнародних грантів. Результатом проведеного циклу робіт є теоретичні та прикладні розробки з теорії сигналів, їх моделювання та відбору інформативних параметрів, високоефективної обробки даних, методів і конструктивних алгоритмів апроксимації складних залежностей, моделювання і прогнозування фізичних процесів, створення принципово нової елементної бази та синтезу високопродуктивних бортових обчислювальних систем і мережевих нейрорподібних структур. Фундаментальні та прикладні результати досліджень дозволили створити нові класи високопродуктивних бортових систем відбору, обробки та передачі даних, які за своїми показниками знаходяться на рівні найкращих світових досягнень, а у ряді випадків перевищують їх. Ці розробки дали можливість вперше створити потужний інформаційний інструментарій для здійснення перспективних наукових космічних досліджень і входження в глобальну світову інформаційну інфраструктуру. Вони можуть бути базою для реалізації сьогодні ряду завдань космічної програми України.

1. А. с. 784537 СССР, МКИ G 01 T 7/00. Устройство коррекции амплитуд импульсов / Я. П. Драган, В. А. Погрибной. — № 2796197/18-25; Заявл. 17.07.79; Оpubл. 16.03.81., Бюл. № 4. — 9 с.
2. А. с. 862699 СССР, МКИ G 01 T 1/16. Устройство для измерения параметров потоков энергичных частиц / В. А. Погрибной и др. — № 2852710/18-25; Заявл. 17.12.79; Оpubл. 16.10.81, Бюл. № 2. — 14 с.
3. А. с. 1080096 СССР, МКИ G 01 T 1/16; G 01 T 1/36. Устройство для исследования параметров потоков частиц / В. А. Погрибной и др. — № 3346675/18-25; Заявл. 12.10.81; Оpubл. 15.03.84, Бюл. № 10. — 6 с.
4. А. с. 1097083 СССР, МКИ G 01 V 5/10. Импульсный радиометр / Р. Ф. Федорив и др. — № 3475377/18-25; Заявл. 28.07.82. — 12 с.
5. А. с. 1103689 СССР, МКИ G 01 T 1/16. Устройство для определения микросплесков / В. А. Погрибной и др. — № 3540045/18-25; Заявл. 18.01.83. — 7 с.
6. А. с. 11794113 СССР, МКИ G 08 G 19/28, 15/06. Устройство для адаптивного сжатия информации / В. В. Грицьк и др. — № 3710938/24-24; Заявл. 11.03.84; Оpubл. 15.09.85, Бюл. № 34. — 2 с.
7. А. с. 1274129 СССР, МКИ H 03 K 3/84. Генератор квазиуассоновского импульсного потока / Р. Ф. Федорив и др. — № 3911358/24-21; Заявл. 12.06.85; Оpubл. 30.11.86, Бюл. № 44. — 4 с.
8. А. с. 1276965 СССР, МКИ G 01 N 22/00. Способ определения уплоярности сегнетоэлектрических кристаллов / Р. Ф. Федорив и др. — № 3835634/24-09; Заявл. 27.12.84; Оpubл. 15.12.86, Бюл. № 46. — 2 с.

9. А. с. 1295427 СССР, МКИ G 06 K 9/36. Устройство для обработки изображений объектов / В. В. Грицьк и др. — № 3946553/24-24; Заявл. 27.08.85; Оpubл. 07.03.87, Бюл. № 9. — 4 с.
10. А. с. 1320827 СССР, МКИ G 08 C 19/28. Устройство для адаптивного сжатия информации / В. В. Грицьк и др. — № 3866884/24-24; Заявл. 05.03.85; Оpubл. 30.06.87, Бюл. № 24. — 3 с.
11. А. с. 1320876 СССР, МКИ H 03 H 17/00. Двумерный цифровой фильтр / В. В. Грицьк и др. — № 4058682/24-09; Заявл. 21.04.86; Оpubл. 30.06.87, Бюл. № 24. — 5 с.
12. А. с. 1339584 СССР, МКИ G 06 F 15/336. Коррелятор / В. А. Погрибной и др. — № 4053704/24-24; Заявл. 20.02.86; Оpubл. 23.09.87., Бюл. № 35. — 6 с.
13. А. с. 1345349 СССР, МКИ H 03 M 3/02, 7/32. Дельта-модулятор / В. А. Погрибной и др. — № 4047426/24-24; Заявл. 27.02.86; Оpubл. 15.10.87., Бюл. № 38. — 4 с.
14. А. с. 1347188 СССР, МКИ H 03 M 3/02, H 03 H 17/06. Цифровой фильтр с дельта-модуляцией / В. А. Погрибной и др. — № 3993168/24-24; Заявл. 17.12.85; Оpubл. 23.10.87., Бюл. № 39. — 2 с.
15. А. с. 1348883 СССР, МКИ G 08 G 13/28. Устройство для передачи кодовых сообщений / В. А. Погрибной и др. — № 3672445/24-24; Заявл. 12.12.83; Оpubл. 30.10.87., Бюл. № 40. — 5 с.
16. А. с. 1363534 СССР, МКИ H 04 N 5/14. Устройство для фильтрации телевизионного сигнала / В. В. Грицьк и др. — № 4100554/24-09; Заявл. 05.08.86; Оpubл. 30.12.87, Бюл. № 48. — 3 с.
17. А. с. 1385263 СССР, МКИ H 03 H 17/04. Цифровой фильтр / В. В. Грицьк и др. — № 4152402/24-09; Заявл. 26.11.86; Оpubл. 30.03.87, Бюл. № 12. — 5 с.
18. А. с. 1388992 СССР, МКИ H 03 M 3/02. Дельта-модулятор / В. А. Погрибной и др. — № 4103358/24-24; Заявл. 11.08.86; Оpubл. 15.04.88., Бюл. № 14. — 3 с.
19. А. с. 1425711 СССР, МКИ G 06 F 15/336. Коррелятор / В. А. Погрибной и др. — № 4075380/24-24; Заявл. 11.05.86; Оpubл. 23.09.88., Бюл. № 35. — 3 с.
20. А. с. 1481828 СССР, МКИ G 08 C 19/28. Устройство для передачи и приема телеметрической информации / В. В. Грицьк и др. — № 4194553/24-24; Заявл. 14.11.86; Оpubл. 23.05.89, Бюл. № 19. — 4 с.
21. А. с. 1509616 СССР, МКИ G 01 J 1/04. Фотометр / Р. Ф. Федорив и др. — № 4136059/31-25; Заявл. 20.10.86; Оpubл. 23.09.89, Бюл. № 35. — 5 с.
22. А. с. 1509920 СССР, МКИ G 06 F 15/16. Матричное вычислительное устройство / В. В. Грицьк и др. — № 4247605/24-24; Заявл. 20.05.87; Оpubл. 23.09.89, Бюл. № 35. — 3 с.
23. А. с. 1556286 СССР, МКИ G 01 J 1/44. Способ измерения интенсивности светового потока и фотометр для его осуществления / Р. Ф. Федорив и др. — № 4325130/31-25; Заявл. 09.11.87. — 7 с.
24. А. с. 1577474 СССР, МКИ G 01 J 1/44. Фотометр / Р. Ф. Федорив и др. — № 4418829/31-25; Заявл. 03.05.88. — 5 с.
25. А. с. 1711332 СССР, МКИ H 03 M 3/00. Кодер знаковой дельта-модуляции / В. А. Погрибной и др. — № 4714774/24; Заявл. 04.07.89; Оpubл. 07.02.92., Бюл. № 5. — 4 с.
26. А. с. 1746523 СССР, МКИ H 03 K 5/22. Амплитудно-временной анализатор / В. А. Погрибной и др. — № 4876739/21; Заявл. 22.10.90; Оpubл. 07.07.92., Бюл. № 25. — 4 с.
27. А. с. 1774345 СССР, МКИ G 06 F 15/336. Адаптивный автокоррелятор / В. А. Погрибной и др. — № 4791432/24; Заявл. 14.02.90; Оpubл. 07.11.92., Бюл. № 41. — 5 с.
28. Айзенберг И. Н. Универсальный логический элемент над полем комплексных чисел // Кибернетика. — 1991. — № 3. — С. 116. — 121.
29. Айзенберг Н. Н., Иваськин Ю. Л. Многозначная пороговая логика. — Киев: Наук. думка, 1977.
30. Батюк А. Е., Опотьяк Ю. В. Перепрограммируемый спец-

- процесор для систем автоматичного управління і контролю. // 2-га Укр. конф. з автоматичного керування («Автоматика-95»). — Львів: НВЦ ІТІС, 1995. — Т. 2. — С. 71–72.
31. Бунь Р. А. Преобразование операторных макромоделей линейных подсистем в дифференциальные уравнения, дополненные уравнениями начальных условий // Отбор и передача информации. — 1987. — Вып. 76. — С. 68–72.
 32. Бунь Р. А., Васильев Е. Д. Алгоритм анализа электронных схем с инжекционным питанием по постоянному току // Отбор и передача информации. — 1983. — Вып. 68. — С. 37–41.
 33. Бунь Р. А., Дачук В. С. Моделирование глобального и региональных кругооборотов углерода в биосфере // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 141–148.
 34. Вальковский В. А. Практические методы усовершенствования параллельных структур программ // Техн. кибернетика. — 1980. — № 5. — С. 130–137.
 35. Вальковский В. А. О синтезе оптимальных программ на базе вычислительных моделей // Программирование. — 1980. — № 6. — С. 27–36.
 36. Вальковский В. А. Лекции по параллельному программированию. Параллелизм в ЭВМ и языках. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1982. — 88 с.
 37. Вальковский В. А. Параллельное выполнение циклов. Метод параллелизации // Кибернетика. — 1982. — № 2. — С. 51–62.
 38. Вальковский В. А. Некоторые методы параллельной организации массовых вычислений // Электрон. моделирование. — 1983. — № 3. — С. 13–20.
 39. Вальковский В. А. Параллельное выполнение циклов. Метод пирамид // Кибернетика. — 1983. — № 5. — С. 51–55.
 40. Вальковский В. А. К проблеме автоматизации разработки системных систем // Архитектура и математическое обеспечение вычислительных систем. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1984. — С. 87–100.
 41. Вальковский В. А. Распараллеливание циклов общего вида методом пирамид // Кибернетика. — 1985. — № 4. — С. 16–21.
 42. Вальковский В. А. Автоматический синтез параллельных алгоритмов // Вычислительные процессы и системы / Под ред. Г. И. Марчука. — М.: Наука, 1985. — С. 109–120.
 43. Вальковский В. А., Зербино Д. Д. Реализация арифметических вычислений в знакопеременных кодах на клеточных автоматах // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 49–64.
 44. Вальковский В. А., Лебедев В. Г. Векторизаторы циклов // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 3. — С. 3–23.
 45. Вальковский В. А., Малышкин В. Е. К уточнению понятия непрорекурсивности языков программирования // Кибернетика. — 1981. — № 3. — С. 55.
 46. Войчишин К. С. О внутренней согласованности параметров солнечного цикла и предвычислении его ординат // Астрон. журн. — 1987. — 64, вып. 3. — С. 617–626.
 47. Войчишин К. С. О возможности выявления функциональных зависимостей в циклической структуре геофизических индексов // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 120–125.
 48. Войчишин К. С., Кисиль В. В. Общее представление и алгоритмы обработки двумерной структуры солнечной циклической // Отбор и передача информации. — 1986. — Вып. 73. — С. 53–57.
 49. Войчишин К. С., Стодилка М. И. О статистической устойчивости солнечной циклической // Астрон. журн. — 1982. — 59, вып. 6. — С. 1171–1183.
 50. Грицык В. В., Бунь Р. А., Дачук В. С. Диакотический подход до моделювання біогеохімічного кругообігу вуглецю в біосфері // Доповіді НАН України. — 1997. — № 4. — С. 77–81.
 51. Грицык В. В. Информационные технологии и системы: состояние и перспектива // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 3–20.
 52. Грицык В. В., Каминский Р. Н., Хома О. И. Об одной математической модели восприятия и обработки зрительной информации. — Львов: ФМИ, 1983.
 53. Грицык В. В., Паленичка Р. М. Быстрый алгоритм ранговой фильтрации изображений // Автоматика. — 1989. — № 1. — С. 24–29.
 54. Дачко А. В., Куксенко В. И., Федорив Р. Ф. Статистические способы оценки интегральных характеристик акустического сигнала // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1990. — № 8. — С. 86–92.
 55. Драган Я. П. Структура и представления моделей стохастических сигналов. — Киев: Наук. думка, 1980. — 348 с.
 56. Драган Я. Энергетична концепція як підсумок та основа сучасної лінійної теорії стохастичних сигналів // Фіз. збірник Наук. т-ва ім. Т. Шевченка. — 1993. — 1. — С. 222–233.
 57. Драган Я. П., Васильев К. К., Казаков В. О. Прикладна теорія випадкових процесів і полів / Під ред. Я. П. Драгана, В. О. Омельченка. — Харків—Львів—Тернопіль, 1993. — 248 с.
 58. Драган Я. П., Погрибной В. А., Рожанковский И. В. и др. Исследование тормозного рентгеновского излучения в эксперименте САМБО // Магнитосферные возмущения в период эксперимента САМБО-79. — М.: ИЗМИРАН АН СССР, 1980. — С. 9–15.
 59. Драган Я. П., Куценко О. К., Погрибной В. А. Методика исследования потоков авроральных частиц // Космич. исслед. на Украине. — 1984. — Вып. 18. — С. 46–51.
 60. Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Вероятностный анализ ритмики океанологических явлений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 319 с.
 61. Драган Я. П., Яворский И. Н. Ритмика морского волнения и подводные акустические сигналы. — Киев: Наук. думка, 1982. — 248 с.
 62. Каминский Р. Н. О временной модели оператора // Распараллеливание обработки информации. — Львов: ФМИ, 1985. — Т. 3. — С. 238–242.
 63. Каминский Р. Н. О восприятии информации оператором при распознавании сложных образов, предъявляемых на экране дисплея // Распараллеливание обработки информации. — Львов: ФМИ, 1987. — Ч. 2. — С. 192–195.
 64. Каминский Р. Н. Оценка оперативности действий персонала в системах управления // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 132–140.
 65. Каминский Р. Н., Панасюк Е. Н. Моделирование работы человека оператора с помощью временных рядов // Распараллеливание обработки информации. — Львов: ФМИ, 1985. — Т. 3. — С. 243–244.
 66. Каминский Р. Н., Хома О. И. Исследование поведения оператора при распознавании сложных образов // Распараллеливание обработки информации. — Львов: ФМИ, 1983. — Ч. 2. — С. 198–200.
 67. Каминський Р. Н. Моделі і характеристики тестових зображень, створених випадковими процесами // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів. — Львів—Харків—Тернопіль, 1993. — Ч. 2. — С. 75–80.
 68. Каминський Р. Н., Емчик Л. Ф., Хома О. Й. Система імовірнісних оцінок і показників діяльності людини-оператора // Інформаційні технології та розпізнавання образів. — Львів—Харків—Тернопіль, 1993. — Т. 3. — С. 90–95.
 69. Клим Б. П., Почапский Е. П., Федорив Р. Ф. Импульсный фотометр ИФ-1Л // Приборы и техника эксперимента. — 1984. — № 1. — С. 238–239.
 70. Кравець І. І., Глова З. В., Ралько Р. М. та ін. Інформаційна система для автоматичного контролю корозійного стану технологічного обладнання / Перша міжнар. конф. з інформ. технологій і систем (ІТІС-93). — Львів: НВЦ ІТІС, 1994. — Т. 1. — С. 27–28.
 71. Кравець І. І., Глова З. В., Ралько Р. М. та ін. Телеметрична система нерестатичних досліджень параметрів атмосфери / Перша міжнар. конф. з інформ. технологій і систем (ІТІС-93). — Львів: НВЦ ІТІС, 1994. — Т. 1. — С. 55–56.

72. Кужий Л. И., Попов Б. А., Фет Я. И. Табличные процессоры с иерархическими интервалами // Вычисл. системы. — 1981. — Вып. 90. — С. 132–144.
73. Кужий Л. И., Олексів Б. Я. Розпаралелювання в багато-процесорних системах, керованих потоками даних та їх налаштування з елементами оптимізації // Відбір та обробка інформації. — 1997. — 11 (87). — С. 129–133.
74. Олексів Б. Я. Розробка інформаційних технологій налаштування високоефективних обчислювальних систем на базі однорідних обчислювальних середовищ: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Львів, 1994. — 23 с.
75. Опотяк Ю. В. Программно-аппаратный комплекс потоковой обработки информации на базе однородных вычислительных сред // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 31–35.
76. Параллельная обработка информации: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1981. — Т. 1: Параллельные методы и средства распознавания образов / Под ред. А. Н. Свенсона. — 280 с.
77. Параллельная обработка информации: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1981. — Т. 2: Параллельные методы и средства распознавания образов / Под ред. В. В. Грицыка. — 280 с.
78. Параллельная обработка информации: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1981. — Т. 3: Вычислительные системы, структуры и среды для решения задач большой размерности / Под ред. В. В. Грицыка. — 288 с.
79. Параллельная обработка информации: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1981. — Т. 4: Высокопроизводительные системы параллельной обработки информации / Под ред. В. В. Грицыка. — 272 с.
80. Параллельная обработка информации: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1981. — Т. 5: Проблемно-ориентированные и специализированные средства обработки информации / Под ред. В. В. Грицыка. — 504 с.
81. Погрибной В. А. Бортовые системы обработки сигналов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.
82. Погрибной В. А. Дельта-модуляция с переменным шагом в цифровой обработке сигналов // Докл. АН УССР. — А. — 1984. — № 3. — С. 68–71.
83. Погрибной В. А. Кросс-коррелятор с симметричными сдвигами // Изв. вузов. Приборостроение. — 1985. — 28, № 6. — С. 39–42.
84. Погрибной В. А. Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. — М.: Радио и связь, 1990. — 216 с.
85. Погрибной В. А., Модла Р. М., Рожанковский И. В. и др. Исследования тормозного рентгеновского излучения в эксперименте САМБО // Магнитосферные возмущения в период эксперимента САМБО. — М.: ИЗМИРАН, 1980. — С. 96–102.
86. Погрибной В. А., Модла Р. М., Рожанковский И. В. и др. Пути повышения надежности работы бортовых цифровых коммутационно-распределительных систем // Космич. исслед. на Украине. — 1984. — № 18. — С. 11–15.
87. Погрибной В. А., Модла Р. М., Рожанковский И. В. и др. Методика исследования потоков авроральных частиц // Космич. исслед. на Украине. — 1984. — № 18. — С. 20–25.
88. Погрибной В. А., Модла Р. М., Рожанковский И. В. и др. Адаптивная система для отбора и быстрого анализа нестационарных сигналов на борту искусственных спутников Земли // Науч. космич. приборостроение. — 1984. — Вып. 4. — С. 31–34.
89. Погрибной В. А., Модла Р. М., Рожанковский И. В. и др. Адаптивный корреляционный анализ локально-стационарных случайных процессов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1996. — 39, № 5. — С. 24–32.
90. Погрибной В. А., Блажеквич Б. И. Бортовые цифровые системы обработки сигналов для искусственных спутников Земли // Науч. космич. приборостроение. — 1984. — Вып. 3. — С. 43–46.
91. Погрибной В. А., Рожанковский И. В. О распределении кодового сообщения при наличии сбоя // Контрольно-измерительная техника. — 1982. — Вып. 31. — С. 44–47.
92. Погрибной В. А., Рожанковский И. В. Методика определения помехоустойчивости многоканального АЦП комбинированного уравнивания // Изв. вузов. Приборостроение. — 1985. — 28, № 2. — С. 37–41.
93. Погрибной В. А., Тимченко А. В. Единый подход к реализации цифровой фильтрации дельта-модулированных сигналов на однородных вычислительных средах // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1996. — 39, № 8. — С. 16–22.
94. Погрибний В. О. Цифровий спектральний аналіз у реальному часі в бортових дослідженнях // Вісник АН УРСР. — 1982. — № 9. — С. 31–39.
95. Погрибний В. О. Інформаційні та процесорні пристрої роботів і систем управління. — Київ: Вища шк., 1990. — 136 с.
96. Погрибний В. О. Цифрова фільтрація сигналів у комбінованих форматах // Доповіді НАН України. — 1996. — № 2. — С. 55–59.
97. Погрибний В. О. та ін. Використання однорідних обчислювальних середовищ для задач комутації // Інформ. та нові технології. — 1996. — № 2. — С. 41–42.
98. Погрибний В. О. та ін. Кореляційний аналіз коротких часових рядів на основі проріджених різниць // Доповіді НАН України. — 1997. — № 2. — С. 47–51.
99. Погрибний В. О., Рожанківський І. В., Юрченко Ю. П. Основи інформаційних процесів в роботизованому виробництві / Під ред. В. О. Погрибного. — Львів: Світ, 1995. — 304 с.
100. Попов Б. А. Равномерное приближение с интерполированием // Отбор и передача информ. — 1980. — Вып. 60. — С. 56–67.
101. Попов Б. А. Равномерное приближение сплайнами. — Киев: Наук. думка, 1989. — 272 с.
102. Попов Б. А. Равномерное приближение четных и нечетных функций сплайнами // Электрон. моделирование. — 1987. — 9, № 6. — С. 8–13.
103. Попов Б. А. Ускорение вычислений при выборе вида приближений // Отбор и обработка информ. — 1991. — Вып. 7 (83). — С. 87–93.
104. Попов Б. А., Теслер Г. С. Приближение функций для технических приложений. — Киев: Наук. думка, 1980. — 352 с.
105. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ. Справочник. — Киев: Наук. думка, 1984. — 600 с.
106. Попов Б. О. Вибір вузлів при рівномірному наближенні сплайнами // Доповіді АН УРСР. — А. — 1986. — № 3. — С. 20–23.
107. Попов Б. О. Визначення похибки рівномірного наближення експоненціально-степеневими сплайнами // Доповіді АН УРСР. — А. — 1986. — № 7. — С. 17–20.
108. Русин Б. П. Системи синтезу, обробки та розпізнавання складноструктурованих зображень. — Львів: Вертикаль, 1997. — 264 с.
109. Федорів Р. Ф. Статистична радіометрія. — Київ: Наук. думка, 1979. — 267 с.
110. Федорів Р. Ф. Вимірювання параметрів слабких світлових потоків // Вісник АН УРСР. — 1983. — № 3. — С. 26–37.
111. Федорів Р. Ф. Вимірювання параметрів імпульсних коливань. — Київ: Наук. думка, 1984. — 152 с.
112. Федорів Р. Ф. Стохастичні вимірювальні сигнали // Вісник АН УРСР. — 1986. — № 6. — С. 103–104.
113. Федорів Р. Ф. Алгоритми оцінювання параметрів випадкових сигналів і полів // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів. — Львів-Харків-Тернопіль, 1993. — Т. 2. — С. 136–139.
114. Чинок В. М. Інформаційний відеоскоп — базовий елемент автоматизованого робочого місця космонавта-дослідника // Космічна наука і технологія. — 1998. — 4, № 4. — С. 103–107.
115. Чинок В., Віхлій О., Конончук С. та ін. Програмно-керовані растри в системах введення зображень фізичних об'єктів // Обробка сигналів та зображень та розпізнавання образів: Праці I Всеукр. конф. — город: изд-во, 1992. — С. 181–182.
116. Aizenberg I. N. Processing of noisy and small-detailed grayscale images using cellular neural networks // J. Electron. Imaging. — 1997. — 6, N 3. — P. 265–280.

117. Aizenberg I. N. Multi-valued non-linear filters and their implementation on cellular neural networks, *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 41 *Advances in Intelligent Systems* / Ed. F. C. Morabito. — Amsterdam—Berlin—Oxford—Tokyo—Washington DC, IOS Press, 1997.—P. 135—140.
118. Aizenberg I. N., Aizenberg N. N. Universal binary and multi-valued neurons paradigm: conception, learning, applications // *Lecture Notes in Computer Science* / Eds J. Mira, R. Moreno-Diaz, J. Cabestany, Springer.—1997.—Vol. 1240.—P. 463—472.
119. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. CNN Based on Multi-Valued Neuron as a Model of Associative Memory for Gray-Scale Images // *Proc. of the Second IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*. — Technical University Munich, Germany October 14—16, 1992. — P. 36—41.
120. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. Fast converged learning algorithms for multi-level and universal binary neurons and solving of the some image processing problems // *Lect. Notes Comput. Sci.* / Eds. J. Mira, J. Cabestany.—1993.—**686**.—P. 230—236.
121. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. CNN-like networks based on multi-valued and universal binary neurons: learning and application to image processing // *Proc. of the Third IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*. — Rome, 1994.—P. 153—158.
122. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N., Belikova T. P. Extraction and localization of important features on gray-scale images: implementation on the CNN // *Proc. of the Third IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications (CNNA-94)*. — Rome, 1994.—P. 207—212.
123. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N., Krivosheev G. A. Multi-valued neurons: learning, networks, application to image recognition and extrapolation of temporal series // *Lect. Notes Comput. Sci.* / Eds. J. Mira, F. Sandoval.—1995.—**930**. — P. 389—395.
124. Bun R. A. Information technologies for the simulation of complex nonlinear electrical circuits // *Pattern Recogn. and Image Analysis*. — 1994.—**4**, N 3.—P. 309—316.
125. Bun R. A. Numerical methods for modelling electrical circuits on the basis of high-order differential equations // *The New Information Technologies in Science, Education, Medicine and Business: The XXIst International Conference*. — Gurfuz—Moscow, 1994.—P. 117—118.
126. Bun R. A. Numerical Modelling Physical Processes and Phenomena Using Differential Equations with Higher-Order Derivatives // *Computational Modelling and Computing in Physics: Int. Conf.* — Dubna, 1996.—P. 46.
127. Bun R. A., Vasil'yev Ye. D. A numerical method for solving differential equations with derivatives of any order // *Computation Mathematics and Mathematical Physics*. — 1992.—**32**.—N 3.—P. 317—330.
128. Dovbush R.T. Parametric Models and Methods of Processing Two-Dimensional Signals with Cyclic Repetition // *Pattern Recogn. and Image Analysis*. — 1994.—**4**, N 3.—P. 295—297.
129. Dragan Ya. P. The energy theory of stochastic signals and a priori analysis of measurement principles used as a basis of information technologies // *Pattern Recogn. and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications*. — 1991.—**4**, N 3.—P. 319—325.
130. Dragan Ya., Krivaya N. R., Yavors'kyi B. I. Estimating the periodicity in the structure of stochastic fields // *Pattern Recogn. and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications*. — 1996.—**6**, N 1.—P. 76—77.
131. Dragan Ya., Sikora L. Energetic concept in the theory of laser grounding // *Proc. of Intern. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-96)*. — Lviv, 1996.—P. 379—381.
132. Dragan Ya., Yavors'kyi B., Chorna L., Sikora L. Energy theory of stochastic signals, separation of classes, and specification of statistical processing algorithms // 1st European Conference on signal analysis and prediction ESCAP-97, Progue. — P. 129—132.
133. Hrytsyk V. High-Productive Structures of Images Processing in Real Time: Problems and Solutions // *Proc. of ITIAPR'90*. — Lviv: Inst. of Physics and Mechanics, 1990.—Vol. 1.—P. 1—15.
134. Hrytsyk V. Information technologies and systems // *Pattern Recogn. and Image Analysis*. — 1994.—**4**, N 3.—P. 3—16.
135. Hrytsyk V. High-productive structures of parallel image processing in real time // *The new information technologies in science, education, medicine and business: Proc. of the XXIst international conference*. — Gurfuz—Moscow, 1994.—P. 24—32.
136. Hrytsyk V. Information technologies for image processing and recognition in real time systems // *Dagstuhl-Seminar on Theoretical Foundations of Computer Vision*. — Berlin, 1994.—P. 136—139.
137. Hrytsyk V., Bun R., Dachuk V. Diaoptical Approach for Modelling Global Carbon Cycle in the Biosphere // *Sustainable Development: System Analysis in Ecology: 2nd Practical Conf.* — Sevastopol, 1996.—P. 32—33.
138. Hrytsyk V., Bun R., Dachuk V. Diaoptical Approach for Modelling Global Carbon Cycle in the Biosphere // *Fourth Ukraine—Russia—China Symposium on Space Science and Technology*. — Kyiv, 1996.—P. 98—100.
139. Hrytsyk V., Kaminsky R. Generalized System Model of Man-Machine Interface for Image Processing // *Pattern Recogn. and Image Analysis: Proc. of Third Intern. Conf.* — Minsk, 1995.—**3**.—P. 212—217.
140. Hrytsyk V., Rozgoni Y. Algorithms and architecture of parallel computer system for the effective signal recognition // *Proc. of Third Intern. Conf. on Computer Analysis of Images and Patterns*. — Leipzig.—Akademic-Verlag Berlin, 1989.—P. 317—319.
141. Hrytsyk V., Rozgoni Y. A model and high effective means of structural speech recognition // *Proc. of 15th Nation. Conf. on Automatic Speech Recognition*. — Tallin, 1989.—P. 201—204.
142. Iavors'kyi B. I., Dragan Ia. P., Dombrov's'kyi L. I., Iavors'kyi V. I. Backgrounds for the On-Earth System Development on On-Line Visualization of the Telemeter Information Under the Active Experiment in Space // *Proc. of IV Ukrainian—Russian—China Symposium on Space Science and Technology*. — Publication NCAN.—Vol. 2.—Kyiv, 1996.—P. 813—815.
143. Iavors'kyi B. I., Dragan Ia. P., Dombrov's'kyi L. I., Iavors'kyi V. I. Backgrounds for the On-Earth System Development on On-Line Visualization of the Telemeter Information Under the Active Experiment in Space // *Proc. of IV Ukrainian—Russian—China Symposium on Space Science and Technology*. — Publication NCAN.—Vol. 2.—Kyiv, 1996.—P. 813—815.
144. Kaminskij R. N. Estimation of Operator Activity in Display System of Images Processing // *Proc. of First International Conference on Information Technologies for Image Analysis and Pattern Recognition. ITIAPR 90*, Oct. 22—28. — Lviv, 1990.—Vol. 2.—P. 291—295.
145. Kaminskij R. N. Mathematical modeling of binary image and object and noise interaction by scanning method // *Machine Graphics and Vision*. — 1996.—**5**, N 1/2.—P. 141—146.
146. Kaminskij R. N. The Time Factor in Estimating the Human Operator Activity in the Human-Machine Interface of Information Technologies // *Pattern Recogn. and Image Analysis*. — 1994.—**4**, N 3.—P. 326—334.
147. Pogribny V., Modla R. M. et al. Increasing the shipborne telemetric systems capacity with the channel frequency division // *Abstracts of papers of 34 Congress of the International Astronautical Federation*. — Budapest, 1983.—P. 33—35.
148. Pogribny V., Savchin O. Programming peculiarity of homogeneous computational media for tasks of correlation analyse with sign DM // *Proc. Conf. on the Signal transmission*

- and processing Problems. — Riga: RTU, 1991. — P. 49–53.
149. Pogribny W., Modla R. M. i in. Algorytmy i realizacje kompresji sygnałów z zastosowaniem analizy ekstremalnej // VI Międzynarodowa Konferencja i Wystawa Wojskowa konferencja telekomunikacji i informatyki. — Jabionna, 1997. — S. 217–224.
 150. Pogribny W., Modla R. M. i in. Analiza ekstremalna oraz kompresja danych na podstawie DM // Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji. — 1997. — 43, N 1. — S. 109–120.
 151. Popov B. A. Information Technology of the Formulaic Representation of Physical Relationship // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1994. — 4, N 3. — P. 306–312.
 152. Popov B. A. Nonlinear Best Chebyshev Approximation and Splines // MMET'96. VIth Intern. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: Proc. — Lviv, 1996. — P. 128–131.
 153. Popov B. A. Hare D. E. G. Using Computer Algebra to Construct Function Evaluation Methods // Maple Tech. — 1996. — 3, N 3. — P. 18–23.
 154. Tkachenko R. Accelerated learning of multilayered neural networks on the base of the new paradigm // Third Conference Neural Networks and Their Applications. — Kule, Poland, Oct. 14–18, 1997. — P. 129–130.
 155. Valkovskii V. A. An optimal algorithms for solving the problems of digital filtering // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1994. — 4, N 3. — P. 241–247.
 156. Valkovskii V. A., Zerbino D. D. Computations on Cellular Automata with Defects // LNCS. — 1997. — 1277. — P. 136–144.
 157. Vasilyev Ye., Bun R. Radioelectronic circuits modelling on the basis of high-order differential equations // The Integration of Purpose Specialists' Training Systems and Automation Technical Systems of Various Purpose: The Intern. Conf. — Alushta-Moscow, 1990. — P. 75.
 158. Voichyshyn K. C. The Procedure of Detecting the General Regularities of the Time Structure of Cyclic Signals // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1994. — 4, N 3. — P. 288–294.
 159. Voichyshyn K. C., Dovbush R. T. Regularity Analysis of two-Dimensional Structure of Solar Cyclicity // ITIAPR'90: Proceedings. — 1990. — Vol. 2. — P. 379–380.

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS IN SPACE RESEARCH: STATE AND PROSPECTS

V. V. Hrytsyk

We present some results of the main fundamental and applied investigations in the field of information technologies and high-performance computing systems for the space exploration which were carried out at the Computer Science Section of the Western Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine. The main scientific papers are reviewed. The current state and prospects of the research and developments and their place in the world science are considered.

УДК 386.6: 629.7

Концептуальні аспекти стандартизації засобів інформатизації у галузі космічних досліджень

К. С. Войчишин¹, Г. В. Микитин²

¹ Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 30.03.98

Обґрунтовуються головні завдання та методологія системи стандартизації засобів інформатизації у галузі космічних досліджень. Пропонується концептуальний підхід до створення державних стандартів України у галузі космічних досліджень стосовно проблем інформатизації.

ВСТУП

Національна програма інформатизації, прийнята в Україні [18], орієнтована на інформаційне забезпечення соціальної, наукової, технічної, економічної, екологічної, космічної, оборонної та інших систем соціального функціонування. Одним з пріоритетів Концепції Національної програми інформатизації є розроблення політики та організаційно-правового забезпечення інформатизації. В число першочергових завдань у галузі інформатизації входить створення концептуальних засад системи стандартизації у науковій, технічній, загальнодержавній сферах діяльності. З метою інтеграції України в світовий інформаційний простір, досягнення цивілізованого взаєморозуміння національного та міжнародного рівня необхідно створити єдину систему понять у різних сферах з подальшою міжнародною стандартизацією, враховуючи при цьому високоефективні технології та інфраструктури.

Становлення української науково-технічної термінології у плані однозначної відповідності високим вимогам національного та світового інформаційного простору є підґрунтям створення основоположних Державних стандартів України (ДСТУ) досліджуваних галузей за розробленою методологією

єю термінологічного забезпечення інформатизації. Неординарності підходів потребує процес розроблення уніфікованих методів, принципів терміноутворення, термінотлумачення, побудови ієрархічної структури термінологічної системи наукової галузі, створення національних стандартів засобів інформатизації, сумісних з міжнародними стандартами та іншими міжнародними науково-технічними документами галузей у цілісній системі стандартизації. До таких актуальних і проблемних напрямків, зокрема, варто віднести: відбір, оброблення, передачу, збереження інформації; метрологію та національну сталону базу; технології і системи у наукових галузях досліджень; нейронні мережі; інфраструктуру наукових галузей; космос та прикладні наукові аспекти і технології, в тому числі космічна біологія, космічна екологія тощо; діагностування, прогнозування та оцінювання екстремних ситуацій; захист інформації; експертні системи.

Важливою і своєрідною є космічна проблематика з точки зору космічної науки як такої та інших наук, які відтворюють її фізичну повноту і функціонування, відповідно до методології стандартизації термінів. Згідно з планом Державної стандартизації України на 1997 р. [2] основними результатами діяльності Держстандарту України в 1992–

1995 рр., програмою його діяльності на 1996–2000 рр. [22] у галузі космічних досліджень створено низку ДСТУ [19].

Сучасне функціонування високих інформаційних, космічних технологій, зокрема теліо- і геоінформаційних, становить певні труднощі щодо терміноутворення, термінозміщення, створення ДСТУ, орієнтованих суто на виведення і застосування у галузі космічних досліджень. При розробленні ієрархічної структури термінологічної системи з космічної науки і технології, яку надалі буде покладено в основу створення відповідних ДСТУ, доцільно врахувати діючі на сьогодні національні, міждержавні, міжнародні стандарти з інформатики, метрології, інформаційних технологій, захисту інформації та інші, адекватні до проблематики космосу та прикладних його аспектів з подальшим проведенням експертизи на предмет критеріїв терміноутворення.

Стаття присвячена осмисленню і розвитку концептуальних аспектів процесу стандартизації засобів інформатизації в галузі проведення космічних досліджень і використання їх результатів.

1. ЗАВДАННЯ СИСТЕМИ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ЗАСОБІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ

Метою Національної програми інформатизації є створення фонду науково-технічної документації України для забезпечення Державної програми розвитку української мови; формування системи стандартизації, сертифікації засобів, технологій і систем у сфері інформатизації; розроблення системи інформаційного забезпечення національних та міжнародних користувачів стандартизації та сертифікації. Програма цілісної системи стандартизації засобів інформатизації передбачає такі завдання:

- формування в Україні єдиних термінів та означень наукових галузей для їх використання у виробництві, наукових дослідженнях, в технічній, науково-технічній, довідковій літературі;
- терміноутворення кореневою системою української мови;
- термінозміщення точним, лаконічним означенням, яке б охоплювало усі значення, що цей термін набуває у суміжних (до означеної) наукових галузях;
- використання принципу систематичності побудови української науково-технічної термінології;
- створення комп'ютерної технології розроблення українських та багатомовних словників сучасної термінології наукових галузей;

- встановлення зв'язку з міжнародними організаціями з метою створення національних стандартів та сертифікатів, сумісних за рівнем інформатизації з світовими;
- розроблення основоположних державних стандартів засобів інформатизації, сумісних з відповідними міжнародними стандартами;
- створення та функціонування професійних груп термінологічної експертизи проектів державних стандартів у сфері інформатизації;
- розроблення автоматизованої інформаційно-довідкової системи державних стандартів та сертифікатів в наукових галузях.

2. МЕТОДОЛОГІЯ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ЗАСОБІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ У ГАЛУЗІ КОСМІЧНОЇ НАУКИ

Науково обгрунтоване формування термінології наукових галузей обумовлюється інформаційними потребами суспільства, створенням методичних принципів, що є в основі побудови терміносистем. Створення наукових терміносистем повинно ґрунтуватись на діалектичному поєднанні понятійних та знакових систем – точності та лаконічності висловлення змісту термінів. Системний підхід є основним у методології терміноутворення, оскільки кожний термін повинен розглядатись з двох позицій – форми та змісту. Становлення української науково-технічної термінології передбачає її уніфікацію, змістом якої є застосування єдиних принципів і способів побудови термінів. Методологія стандартизації засобів інформатизації уніфікована згідно з положеннями міжнародного стандарту [17].

У космічній науці і технології використовують терміносистеми, які відносяться до різних наукових галузей: прикладної математики, фізики, радіоелектроніки, метрології, медицини, біології, астрономії та інших наук. Різноманітність понять космічної галузі вносить певні труднощі у наукові розроблення та експлуатацію космічної техніки, технології. Це обумовлює необхідність створення відповідної терміносистеми космічної галузі, в структурі якої кожному поняттю відповідає унікальний термін з лаконічним науково обгрунтованим означенням, узгодженим зі змістом термінів суміжних наукових галузей.

Основними підходами до вирішення проблеми стандартизації засобів інформатизації у галузі космічних досліджень України є економічний, лінгвістичний та організаційно-технічний. Останні два підходи визначають конкретні можливості і шляхи розв'язання проблеми стандартизації термінів. Ос-

повними чинниками, які впливають на реалізацію можливостей, є рівень розвитку інформаційної та космічної техніки в державі, її інфраструктури і розвитку лінгвістики як науки. Розвиток інформаційних, космічних технологій і їх проникнення в усі сфери людської діяльності здійснюється настільки швидко, що термінологічні стандарти ГОСТ, будучи чинними сьогодні в Україні, є неповними, неточними, недоцільними. Це обумовлює застосування нових класифікаційних підходів до термінології космічної науки і технології, які передбачають об'єднання діючих стандартів різних груп в одну, спільну за змістом і за формою; розгляд альтернативних понять на предмет змістового навантаження та англо-франкомовної адекватності; експертування на предмет терміноутворення кореневою системою української мови, чужомовного запозичення термінів, термінозміщення.

На сьогодні, згідно з програмою стандартизації засобів інформатизації, актуальними є розроблення Державних стандартів України, гармонізованих з міжнародними стандартами ISO у галузі космічної науки, створення баз даних національних термінів на основі міжнародних стандартів з можливістю входження у світовий інформаційний простір.

Створення перенесених основних положень державних стандартів засобів інформатизації у різних досліджуваних наукових галузях, у тому числі космічній, вимагає, передусім, багатоваріантного удосконалення науково-технічних термінологічних систем. Процес реформування традиційної термінології та необхідність наблизити українську термінологію до міжнародної потребує розгляду альтернативних понять у галузі космічних досліджень. Формування та стандартизація української науково-технічної термінології у космічній галузі та суміжних з нею науках ґрунтується на фізичній терміносистемі, яка є родовою. Сучасний процес розроблення термінологічних стандартів відбувається від зворотного, тобто створення галузевих стандартів, в той час як фізична терміносистема потребує відповідного переосмислення та вибродкування. Наприклад, аналізу потребують такі поняття як «розмір фізичної величини», «істинне значення фізичної величини» на предмет відповідності форми їхньої змістові, доцільності їх стандартизації [12, 28].

Наявність англо-франкомовних відповідників є необхідною умовою входження української науково-технічної термінології як стандартизованої у міжнародні терміносистеми. Так, наприклад, поняття «розмір фізичної величини», «фізичний параметр», «датчик» відсутні у міжнародному словнику фундаментальних і основних термінів метро-

логії [29]. Удосконалена структура та ієрархічні відношення між поняттями родової фізичної терміносистеми знайде подальше своє відображення у галузевих терміносистемах. Сьогоднішній процес термінологізації у космічній галузі залучає терміни інших наук.

Уникнення семантичної трансформації термінів дасть можливість зменшити кількість вихідних понять космічної науки, що відповідно суттєво відтворить кількість похідних терміноелементів. Необхідність альтернативних понять обумовлюється і тим, що сьогоднішнє розроблення Державних стандартів України обмежується калькуванням російських відповідників, неадекватністю перекладу за змістом терміна-відповідника іншомовного походження.

3. ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ У ГАЛУЗІ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Багатогранність космічних досліджень визначається постановкою задач, можливістю їх реалізації за рахунок розвитку науки, високих технологій, освоєння нових енергетичних ресурсів, перспективних міжнародних космічних програм.

Одним з актуальних напрямків космічних досліджень є космос і екологія. Виділимо такі задачі цього напрямку [23]:

- контролювання впливу процесів в навколосемному космічному просторі на стан повітря, води, ґрунту, біосфери, геліо-геофізичних ситуацій, здоров'я людей;
- створення методів та засобів контролю космічного простору;
- розроблення алгоритмічних та бортових програмно-апаратних засобів оброблення даних про сонячну активність, сонячний вітер, зміни геомагнітного поля, рівень озону в земній атмосфері з метою діагностування та прогнозування стану довкілля та екстремних ситуацій на Землі;
- розроблення медико-біологічних, психологічних, правових, філософських підходів до освоєння людством космосу;
- розроблення методів і засобів комплексного оброблення інформації про екологічну екстремну ситуацію;
- створення експертних систем діагностування, прогнозування, оцінювання екологічних екстремних ситуацій довкола космічних орбітальних станцій, Землі.

Керування космічними дослідженнями передбачає необхідність аналізу інформації, оперативного,

якісного оброблення її з метою практичного застосування результатів. Комп'ютеризація, інформатизація, інтелектуалізація є тими сферами діяльності суспільства, які дають змогу вирішувати задачі проблематики «космос – екологія».

Інформатизація у сфері космічних досліджень орієнтована на розширення можливостей відбору, оброблення, аналізу, освоєння, практичного використання інформації. Ці можливості реалізують високо інтелектуальними технологіями. Інформатизація певної досліджуваної наукової галузі своєрідна. Ця своєрідність полягає у певних проблемах. У галузі космічних досліджень інформатизація стосується таких проблем [1, 8, 26, 27]:

- діагностування, прогнозування, оцінювання стану навколоземного космічного простору, екстремних ситуацій на Землі;
- інформаційно-прогностичного забезпечення штучних космічних об'єктів;
- створення експертної системи дистанційної космічної освіти для підготовки та перепідготовки космонавтів;
- захисту інформації.

Одним з факторів впливу стану навколишнього космічного простору на біосферу Землі є сонячна активність. Контролювання та прогнозування сонячної активності дозволяє застерігати космонавтів, екіпажі висотних авіалайнерів від впливу випромінювань, попередити уникнення екстремних медико-біологічних ситуацій на Землі.

У світі з проблеми прогнозування сонячної активності виконуються такі програми як «Унід» (США), «Солар-А» (Японія), «Сохо» (Франція) [8]. Роботи з проблем розроблення та дослідження інформаційних технологій прогнозування сонячної активності ведуться в Державному науково-дослідному інституті інформаційної інфраструктури (Львів). На сьогодні інформація про сонячну активність та її вплив на довкілля Землі не завжди можуть бути піддані оперативному аналізу з подальшим практичним використанням результатів через відсутність необхідних бортових спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем, а також постановки відповідних експериментів.

Якщо в подальшому на землі в стаціонарних умовах в структурі цих даних і вдається виявити і розпізнати діагностично-прогностичну інформативність, її актуальність для практики може бути безповоротно втрачена. Доцільним є створення фундаментальних основ, алгоритмічних та бортових апаратних засобів оброблення та системного аналізу результатів комплексного дослідження рекурентної фотосферно-корональної активності Сонця і відповідної їм іоносферно-магнітосферної актив-

ності для проведення діагностування та прогнозування довкілля орбітальних станцій і Землі [4, 7, 9, 30].

Актуальне контролювання у космічному просторі штучних супутників Землі, оскільки у проблематичній «космос – екологія» вони своїм функціонуванням призводять до таких негативних явищ як, руйнування озонового шару, випадання кислотних дощів, тотального потепління. Сьогодні практикують складання інформаційного каталогу штучних космічних об'єктів, в якому наводять різні характеристики систем: показники виявлення і супроводження (точність визначення орбіт ШСЗ, точність прогнозування орбіт, ступінь відповідності реальних та розрахункових значень похибок), точність визначення часу і місця припинення існування космічного об'єкта [27].

Рівень інформатизації у сфері освіти сьогодні сягнув дистанційного освоєння відповідних наук. Прикладом тому є створені і функціонуючі світові Internet-технології. В Україні також швидко поширюються процес використання інформаційних Internet-технологій та входження у світову глобальну інформаційну інфраструктуру. У космічній галузі є перспективи дистанційної космічної освіти для підготовки та перепідготовки космонавтів на базі розподіленої мережі наукових центрів, високих космічних технологій через супутникові, оптико-волоконні лінії зв'язку [1]. Експертні системи є основою дистанційної космічної освіти. Підґрунтям експертної системи є уніфікована система основних понять, термінів та означень у галузі дистанційної освіти, створення якої є актуальним для України. Для порозуміння в процесі підготовки космонавтів необхідно створити спеціальний тезаурус [25].

Створення високоінтелектуальних інформаційних, космічних технологій потребує вирішення проблеми захисту інформації. На сьогодні Держстандартом України розроблено основні положення і порядок проведення технічного захисту інформації [13, 14]. Але ця проблема не має меж щодо її кінцевого вирішення, оскільки її рунієм є прогрес науки і технологій. У такому разі необхідна модель технології реалізації засобів захисту, яка на рівні стандарту регламентувала би часткові підходи до оцінки захищеності.

4. СТАНДАРТИЗАЦІЯ ЗАСОБІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ У ГАЛУЗІ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблення державних стандартів України засобів інформатизації у галузі космічних досліджень передбачає розв'язання проблеми стандартизації

термінології з врахуванням мовного та організаційно-технічного аспектів. Йдеться про застосування принципу адекватності структури космічної науки і технології та її термінологічного відображення. Це дозволяє використовувати для терміноутворення апарат системного моделювання з подальшим перетворенням груп термінів у галузі космічних досліджень з означенням термінів інших суміжних предметних галузей, наприклад, фізики, космофізики, геофізики, астрофізики та інших. Підґрунтям створення основоположних державних стандартів засобів інформатизації в галузі космічних досліджень є терміноутворення, термінотлумачення та впорядкованість. Не порушуючи усталених принципів і методів стандартизації термінології і використовуючи дедуктивний метод термінологічної системи у галузі космічних досліджень, доцільно розглянути такий варіант впорядкованості термінів. Згідно з проблематикою космічних досліджень, яка відслідковує питання від технології реєстрації штучних космічних об'єктів до створення високих інформаційних, космічних технологій, інфраструктур, пропонується дати означення: вихідних однослівних термінів у галузі космічних досліджень; двослівних термінів, основу яких складають вже відомі за формою і змістом однослівні терміни, а разом вони несуть нове змістове навантаження; трислівних термінів, основу яких аналогічно складають двослівні терміни [21]. Пропонується така структура терміносистеми космічної науки і технології: об'єкт, джерело, інформація, експеримент, інформаційні та космічні технології і системи, засоби та методи відбору, оброблення, передачі та збереження інформації, діагностування, прогнозування, оцінювання, випробування, метрологічне забезпечення, інформаційна та космічна інфраструктура.

Такий підхід до впорядкування терміносистеми космічних досліджень є раціональним у сенсі стандартизації засобів інформатизації. Це дасть змогу розглянути термін «інформація» як функціонування означених одно-, дво-, трислівних термінів. Однослівний термін «інформація» може бути означений на основі послідовно означених однослівних термінів, що йому передують, таких як: об'єкт, джерело, спостереження, властивість, ознака, сприйняття, порівняння, розпізнавання, відомості, система, технологія, сигнал, величина, міра, вимірювання, значення, точність, діагностування, прогнозування, оцінювання, ситуація у своїй функціональній значимості.

Регламентація термінів та означення основних понять у галузі космічних досліджень, встановлення єдиної системи понять дасть змогу ввести їх у

відповідний галузевий стандарт України з подальшим впровадженням. Використання різних інформаційних та космічних технологій, інформаційної та космічної інфраструктури, каталогу національних та міжнародних стандартів в галузі космічних досліджень забезпечить ефективне взаєморозуміння науковців, розробників космічної галузі, космонавтів національного та міжнародного рівня. Методологічні засади розбудови української науково-технічної термінології є підґрунтям для комп'ютерної технології розроблення багатомовних тлумачних словників космічної галузі. Процес розроблення буде досконалим, якщо буде враховано досвід міжнародної термінологічної праці Технічного комітету N1 при створенні міжнародного електротехнічного словника ІЕС. Розроблення та впровадження в Україні основоположних державних стандартів з відбору, оброблення інформації, діагностування, прогнозування екстремних ситуацій, інформаційних космічних технологій, захисту інформації, сумісних з міжнародними стандартами ISO, ІЕС дозволить реалізувати автоматизовані довідкові системи, які передбачають прямий доступ до інформації у базах даних, що забезпечує миттєвий пошук інформації у межах світового інформаційного простору.

Актуальним залишається реальний підхід до створення Державних стандартів України у галузі космічних досліджень. Розглянемо діючий сьогодні Державний стандарт України «Системи супутникові радіонавігаційні мережі». Терміни та визначення» [15]. Стандарт складається з трьох розділів — «Загальні питання», «Підсистема навігаційних супутників», «Підсистема апаратури споживача». Його викладено українською і російською мовами, кожному українському терміну встановлено російський, німецький, англійський, французький відповідник. Стандарт гармонізований з документами нормативно-технічними міжнародної організації цивільної оборони ICAO, Технічного комітету авіації з електронного обладнання аеронавігаційної корпорації AEEC ARINC. Розроблено його у взаємозв'язку з стандартом ГОСТ [10] та державним стандартом України «Системи радіонавігаційні. Терміни та визначення» [16]. Щодо змісту і форми означень термінів стандарту, то зауважимо, що терміни означено «реальною мовою», яка сформувалась в радянські часи і відображена у відповідних словниках, довідниках. Наприклад, термін «супутникова радіонавігаційна система» означено як «радіонавігаційна система, заснована на використанні рухомих радіонавігаційних пунктів штучних супутників Землі, оснащених відповідним радіонавігаційним обладнанням». Українська науко-

во-технічна термінологія повинна ґрунтуватись на принципі «автентичної мови», яка передбачає термінотворення кореневою системою.

Термін «космічна радіотехнічна система» означено як «супутникова радіонавігаційна система, яка забезпечує пошук та знаходження морських і повітряних суден, що терплять аварію», що підкреслює неповноту змісту щодо функціонального навантаження. Теж ж саме стосується термінів «прогноз видимості супутників», «час сходу супутника», «первинна обробка інформації», «вторинна обробка інформації».

Термінологічні стандарти України у галузі космічних досліджень повинні розроблятись згідно з концепцією термінотворень, яка передбачає такі критерії: адекватність, деривантність (здатність творення похідних), економність (стислість) написання та звучання, ефонічність (милослухність) [24]. Основним критерієм щодо розроблення державних стандартів є керівний документ, в якому подаються основні положення та порядок розроблення стандартів на терміни та визначення [20]. На підставі цього документа за період з 1993–1997 рр. створено Державні стандарти України в галузі космічних досліджень, які об'єднують стандарти з інформатики, інформаційних технологій, спеціального вимірювального обладнання для телекомунікаційних систем, метрології, авіації, космічної техніки та інших суміжних за фізичним змістом термінів і їх означень, наукових галузей. Наведено ДСТУ на терміни та означення у галузі авіації та космічної техніки [19].

На сьогодні введені такі державні стандарти України у галузі авіації та космічної техніки:

- ДСТУ 2598-94 Системи посадки повітряних кораблів радіотехнічні. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2599-94 Системи супутникові радіонавігаційні мережі. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2902-94 Системи радіонавігаційні. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2713-94 Засоби радіоелектроніки бортові авіаційні. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2814-94 Радіолокатори для керування рухом повітряного транспорту. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2819-94 Радіотехнічне забезпечення обслуговування повітряного руху. Терміни та визначення.
- ДСТУ 2918-94 Передавання мовних сигналів каналами авіаційного зв'язку. Терміни та визначення.
- ДСТУ 3155-95 Тренажери та моделювальні комплекси авіаційні. Терміни та визначення.

— ДСТУ 3228-95 Аеродроми цивільні. Терміни та визначення.

— ДСТУ 3249-95 Системи керування рухом повітряних кораблів. Терміни та визначення.

— ДСТУ 3271-95 Індикатори відображення видової інформації бортові. Терміни та визначення.

— ДСТУ 3432-96 Авіаційна наземна техніка. Терміни та визначення.

— ДСТУ 3285-95 Системи автоматизованого обліку даних з повітряними кораблями. Основні положення.

— ДСТУ 3372-96 Система технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки. Організація гарантійного обслуговування авіаційної техніки. Основні положення.

— ДСТУ 3421-96 Система технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки. Основні положення.

Прогресивність стандартизації засобів інформатизації у галузі космічних досліджень, у сенсі перспективного виконання Національної Програми Інформатизації зумовлена спільною працею з міжнародною організацією зі стандартизації (ISO). Держстандарт України представляє Україну в міжнародній організації ISO з 1993 року. Україна виступає активним членом в трьох координаційних Комітетах ISO: CASCO — комітет з оцінки відповідності, INFCO — комітет з вивчення наукових принципів стандартизації [22]. Україна сьогодні є членом ISONET — інформаційної мережі ISO.

5. ПЕРСПЕКТИВНІ ДЕРЖАВНІ СТАНДАРТИ УКРАЇНИ У ГАЛУЗІ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Створення галузевої системи науково-технічних термінів здійснюється на засадах національної концепції стандартизації з урахуванням міжнародної практики термінотворення, наукового розвитку космічної галузі та оформлення термінологічною розбудовою її досягнень. Розроблення низки основоположних державних стандартів передбачає подальший розвиток стандартизації в Україні шляхом встановлення єдиної уніфікованої термінології у космічній галузі. Для керування космічними системами, польотами, інформаційно-прогностичного забезпечення балістичних розрахунків орбіт космічних об'єктів, прогнозування екстремних ситуацій довкола космічних станцій і на Землі актуальним є напрям стандартизації — «відбір, оброблення, збереження інформації».

Термінологічний стандарт з відбору, оброблення та збереження інформації має перспективу розроблення вперше в Україні. Відсутність такого стан-

дарту та відповідної науково-технічної документації, яка регламентує вживання термінів та означень з відбору, оброблення та збереження інформації створює труднощі при розробленні нових конкурентоспроможних інформаційних, космічних систем і технологій, систем захисту космічних технологій від можливих втрат інформації, методів та інформаційно-аналітичних систем прогнозування, оцінювання і виходу з потенційно небезпечних ситуацій, створеними техногенним впливом на довкілля Землі.

У побудові космічної терміносистеми важливі принципи систематичності [11]. Системність побудови наукової термінології з відбору, оброблення та збереження інформації така. Використовуються системні моделі космічної науки, теорії сигналів, теорії вимірювання, теорії розпізнавання як наук, які встановлюють структури предметних галузей, закономірності взаємодії їх елементів та розвитку. Пропонується така структура проекту державного стандарту України «Методи, засоби відбору, оброблення та збереження інформації». У вступі буде визначено галузь поширення стандарту, наведено короткі пояснення до інших розділів стандарту. У розділі «Загальні поняття» буде встановлено терміни та означення експерименту, об'єктів, методів, засобів відбору та оброблення інформації. У розділі «Сигнали» буде встановлено терміни та означення, які характеризують структуру, ознаки, моделі сигналів. В розділі «Селектори» буде встановлено терміни та означення, які характеризують структуру і відповідно класифікацію селекторів в залежності від вибраної моделі сигналу. У розділі «Формувачі» буде встановлено терміни та означення, які характеризують структуру формувачів, що готують дані для оброблення сигналів засобами обчислювальної техніки. У розділі «Обчислювальні пристрої» буде встановлено терміни та означення, які характеризують принципи функціонування обчислювальних пристроїв в залежності від статистичних властивостей інформаційних елементів сигналу і досліджуваного середовища, конкретних алгоритмів оброблення представленої у певній формі вимірювальної інформації. У розділі «Інформаційні технології» буде встановлено терміни та означення, які характеризують загальну архітектуру відбору, оброблення та збереження даних. У розділі «Інформаційна інфраструктура» буде встановлено терміни та означення, що характеризують представлення сукупності закономірно пов'язаних предметів, інформаційних явищ, технологій систем, які визначають її склад, внутрішні та зовнішні зв'язки. Кожному українському терміну буде встановлено англо-, франкомовний відповідник. Про-

понований стандарт має перспективу для розроблення шляхом модернізованого застосування міжнародних стандартів, словників ISO, IEC, VIM.

В Україні відсутні базові стандарти інформаційно-прогностичного забезпечення підготовки та проведення запуску орбітальних космічних станцій та штучних супутників Землі, зокрема відсутній такий стандарт для балістичних розрахунків орбіт довготривалих польотів космічних об'єктів. Тому виникає необхідність в розробленні проекту державного стандарту України з методики прогнозування індексів сонячної активності, параметри якої входять в розрахункові формули балістиків. Актуальність такого стандарту мотивується також необхідністю відбору нових відомостей з термінології досліджуваної галузі, використання нових наукових досягнень та інформаційних технологій і систем в галузі прогнозування сонячної активності і спричинених нею екстремних ситуацій на Землі та в її довіллі.

Перевагами пропонованого розроблення стандарту є нововведення моделей, алгоритмів, програмних засобів передобчислення індексів сонячної активності і на цій основі створення відповідної інформаційної інфраструктури. Що стосується впорядкування термінології досліджуваного питання, то буде вилучено з вжитку багатозначні, неточні, громіздкі терміни, терміни-синоніми. Джерелами інформації в процесі розроблення пропонованого стандарту були 6 нині чинний в Україні ГОСТ 25645, 302-83 «Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности» та міжнародні стандарти ISO в галузі прогнозування.

Розроблення пропонованого стандарту орієнтовано не лише на підвищення ефективності інформаційно-прогностичного забезпечення балістичних розрахунків орбіт космічних об'єктів. Тому в процесі розроблення цього стандарту доцільним є узгодження з потребами ширшого кола споживачів науково-технічної продукції такого типу. Перспективний проект, таким чином, міг би бути ефективно використовуваним, наприклад, для метрологічних перевірок засобів акустико-інтерферометричного зондування іоносфери з метою вивчення інформативних параметрів її структури для розроблення відповідних сертифікатів та систем якості прогнозування.

Перевагами пропонованого розроблення стандарту є використання в ньому нових, виявлених в структурі сонячної циклічності [4, 6, 7], важливих для практики прогнозування геліофізичних індексів закономірностей зв'язку параметрів 11-річного циклу чисел Вольфа, що дають кількісну інтерпре-

тацію і узагальнюють закон Швабе-Вольфа [30]. Ці закономірності дозволяють розв'язувати задачу передобчислення не лише середньоквартальних, але і середньомісячних спостережуваних значень чисел Вольфа, оцінити розподіл точності їх апроксимації і прогнозування за фазами сонячного циклу. Особливістю апроксимованих середньомісячних спостережуваних чисел Вольфа в сенсі роботи [7] є те, що їх циклічна структура — це результат перетворення однієї і тієї ж, нормованої на одиницю усередненої (еталонної) функції форми 11-річного сонячного циклу з заданими параметрами. Ця обставина дозволяє формувати задачу ефективного прогнозування сонячної циклічності як задачу оптимального приведення еталонної функції форми або її віток росту і спаду до функціонально зв'язаних між собою параметрів прогнозованого сонячного циклу. Один з цих параметрів прогнозується на підставі завадостійких закономірностей сонячно-магнітосферної активності, отриманих для рангованих середньомісячних значень Кр-індексу [4], що сумарно забезпечує ефективність методики прогнозування індексів сонячної активності.

Процес розроблення ДСТУ у галузі космічної науки і технології має не лише особливі методологічні підходи, але і своєрідність тематики та структуру її висвітлення. Так у запропонованому стандарті «Методи, засоби відбору, оброблення та збереження інформації» його структура має термінологічний зміст. Основною метою таких стандартів є означення термінів. Іншого роду ДСТУ орієнтовані на розроблення алгоритмів, методик, технічних засобів, випробувань, тощо за допомогою вже стандартизованих термінів певної галузі з подальшим впровадженням їх стандарту, який встановлює основні вимоги щодо застосування.

ВИСНОВКИ

Процес створення основоположних державних стандартів засобів інформатизації в контексті концептуальних засад стандартизації у галузі космічних досліджень варто орієнтувати на наступні його аспекти: розроблення методології та координування термінологічного забезпечення інформатизації космічної науки і технології; створення раціональної, уніфікованої єдиної термінологічної системи у галузі космосу та його прикладних аспектів; обґрунтування та викладення принципу систематичності побудови термінології; створення класифікатора груп стандартів стосовно досліджуваних прикладних космічних аспектів.

1. Богомолов В. П., Костин Р. И. Анализ структуры экспертной системы дистанционного космического образования // Проблемы информатизации. — 1996. — № 3. — С. 18—21.
2. Бюлетень інформаційних матеріалів з стандартизації, метрології та сертифікації. — Київ: Державний комітет України з стандартизації, метрології та сертифікації. Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації та інформатики. — 1997. — Вип. 2. — С. 5—22.
3. Войчишин К. С. О внутренней согласованности параметров солнечного цикла и предвычисления его ординат // Астрон. журн. — 1987. — 64, вып. 3. — С. 617—626.
4. Войчишин К. С. Особенности магнитосферного преобразования гелиосигналов // Отбор и обработка информации. — 1988. — Вип. 1 (77). — С. 53—57.
5. Войчишин К. С. О возможности выявления функциональных зависимостей в циклической структуре гелиофизических индексов // Пробл. автоматизации и информатики. — 1997. — № 1. — С. 120—125.
6. Войчишин К. С., Довбуш Р. Т. Повышение эффективности предвычисления высоты солнечных циклов // Отбор и обработка информации. — 1989. — Вип. 3 (79). — С. 76—81.
7. Войчишин К. С., Стодилка М. И. О статистической устойчивости солнечной циклическости // Астрон. журн. — 1982. — 59, вып. 6. — С. 1171—1183.
8. Гарбук Р. В., Гусев А. И., Завируха В. К. Задачи регионального центра мониторинга окружающей среды по экологическому контролю космического пространства // Пробл. информатизации. — 1995. — Вип. 1. — С. 65—67.
9. Гибсон Э. Спокойное Солнце. — М.: Мир, 1977. — 408 с.
10. ГОСТ 21536-76. Системы радионавигационные дальномерные и разностно-дальномерные. Термины и определения. — М: Госком СССР по стандартам, 1977. — 40 с.
11. Драган Я. П. Принципы систематичності побудови термінології теорії сигналів // Тези Другої міжнар. наук. конф. «Проблеми української науково-технічної термінології». — Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1993. — С. 124—128.
12. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1994. — 69 с.
13. ДСТУ 3396.0-96. Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення. — Київ: Держстандарт України, 1994. — 35 с.
14. ДСТУ 3396.1-96. Захист інформації. Технічний захист інформації. Порядок проведення. — Київ: Держстандарт України, 1994. — 38 с.
15. ДСТУ 2599-94. Системи супутникові радіонавігаційні мережні. Терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1994. — 32 с.
16. ДСТУ 2902-94. Системи радіонавігаційні. Терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1994. — 42 с.
17. ИСО 704-87. Принципы и методы терминологии. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 16 с.
18. Закон України «Про Національну програму інформатизації» // Урядовий кур'єр. — 1998. — 12 березня 1998 р.
19. Каталог нормативних документів (затверджених та зареєстрованих за станом на 1 січня 1997 р.). — Київ: Держстандарт України, 1997. — 380 с.
20. КНД 50-011-93. Основні положення та порядок розробки стандартів на терміни та визначення. — Київ: Держстандарт України, 1993. — 36 с.
21. Микитин Г. В., Федорів Р. Ф. До проблеми формування української термінології в галузі вимірювання // Тези Другої міжнар. наук. конф. «Проблеми української науково-технічної термінології». — Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1993. — С. 109—113.

22. Основні результати діяльності Держстандарту України в 1992–1995 рр. Програма діяльності на 1996–2000 рр. Прогноз на 2001–2005 рр. — Київ: Держстандарт України, 1997. — 27 с.
23. Панасюк М. И., Власов М. Н. Семинар: «Космос и экология: концепции и технические решения» // Космич. исслед. — 1992. — 30, вып. 6. — С. 855–856.
24. Перхач В. Про засади відродження та розвитку української науково-технічної термінології // Науково-технічне слово. — 1993. — № 1 (2). — С. 83–96.
25. Рось А. Информационные системы нового поколения как фактор обеспечения национальных интересов // Информатизация та нові технології. — 1996. — № 2. — С. 2–6.
26. Сидякин В. Г., Темурьянц Н. А., Макеев В. Б. и др. Космическая экология. — Киев: Наук. думка, 1985. — 176 с.
27. Хуторовский З. Н. Ведение каталога космических объектов // Космич. исследования. — 1993. — 31, вып. 4. — С. 101–114.
28. Юдин М. Ф., Селиванов М. Н. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник. — М: Изд-во стандартов, 1989. — 112 с.
29. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM) // ISO. — 1987. — 37 p.
30. Voichishin K. S. The procedure of detecting the general regularities of the time structure of cyclic signals // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1994. — 4, N 3. — P. 288–294.

CONCEPTUAL ASPECTS OF STANDARDIZATION OF INFORMATIZATION MEANS IN SPACE RESEARCH

K. S. Voichyshyn and G. W. Mykytyn

We propose a conceptual approach to the creation of the Ukrainian state standards in the informatization in space research.

УДК 621.376.56

Адаптивний кореляційний аналіз локально-стаціонарних випадкових сигналів для бортових експериментів

В. О. Погрібний^{1, 2}, А. Собульський², І. В. Рожанківський³,
Я. В. Грень³, З. Джицімський²

¹Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

²Інститут телекомунікацій Сільськогосподарсько-технічної академії, Бидгощ, Польща

³Державний університет «Львівська політехніка», Львів

Надійшла до редакції 30.03.98

Подано адаптивний алгоритм визначення кореляційних функцій в реальному часі для аналізу стаціонарності з використанням ковзного вікна, що пересувається з дискретністю одного відліку. Аналіз стаціонарності полягає в порівнянні середніх та дисперсій випадкового процесу на поточному інтервалі аналізу і на поточному довірчому інтервалі. Здійснене порівняння похибок дисперсії для алгоритмів з кроковим та ковзним вікном. Подана структурна схема бортового адаптивного корелятора.

ВСТУП

При проведенні багатьох фізичних експериментів у верхніх шарах атмосфери та космічному просторі, що мають наукове та прикладне значення, досліджуються випадкові фізичні поля — електричні та магнітні і їх стохастичні взаємозв'язки. Проведенню аналізу на Землі перешкоджає обмежена пропускна здатність телеметричних систем, яка не дозволяє передавати в режимі реального часу великі масиви даних, отримані від первинних вимірювальних перетворювачів. Тому часто цифрову обробку сигналів здійснюють на борту. Бортова обробка сигналів ускладнюється їх нестаціонарністю та необхідністю обробки в реальному часі.

Методи кореляційного аналізу (КА) стаціонарних сигналів розроблені вже давно [1, 2, 4], але їх використання для аналізу нестаціонарних випадкових процесів (ВП) в реальному часі вимагає відповідних модифікацій. Деякі нестаціонарні сигнали

на окремих ділянках поведуть себе як стаціонарні процеси. Такі інтервали називають інтервалами локальної стаціонарності, а сигнали — локально-стаціонарними. Запропоновані Бендатом та Пірсом методи обробки таких сигналів не дозволяють реалізувати їх в режимі реального часу. Завдання вибору інтервалів ускладнюється, коли з допомогою корелятора по чергово в часі обробляються сигнали від первинних вимірювальних перетворювачів різних фізичних величин. Запропонований Погрібним [2] метод, який базується на кроковому пересуванні вікна аналізу, не забезпечує заданої точності визначення змінних інтервалів локальної стаціонарності. Тому доцільна розробка нових, ефективних алгоритмів адаптивного КА в реальному часі з використанням ковзних вікон, що пересуваються з кожним відліком.

На локально-стаціонарних інтервалах реалізації сигналу оцінка функції кореляції описується виразом:

$$\hat{K}_{xx}(m) = \frac{1}{N_A(t) - m + 1} \sum_{i=0}^{N_A(t)-m} \dot{x}_i \dot{x}_{i+m},$$

де $N_A(t) = \text{ENT}(\Theta_A / T)$ — довжина локально-стаціонарного часового ряду, Θ_A — тривалість аналізу, T — період дискретизації, m — часовий зсув кореляційної функції, $\dot{x}_i = x_i - \bar{x}$, $\bar{x}$ — середнє значення сигналу на локально-стаціонарній ділянці.

Для визначення тривалості інтервалу локальної стаціонарності ВП визначаємо середнє та дисперсію на кожному елементарному інтервалі реалізації ВП, що складається з N_{el} відліків. Інтервал реалізації, що складається з послідовності елементарних інтервалів, будемо вважати інтервалом локальної стаціонарності, якщо для нього виконуються наступні вимоги:

- різниця між середніми на поточному та довірчому інтервалах реалізації ВП не перевищує відповідного допустимого відхилення, заданого апіорі;
- різниця між дисперсіями на поточному та довірчому інтервалах реалізації ВП не перевищує відповідного допустимого відхилення, заданого апіорі.

ВИБІР ІНТЕРВАЛІВ ЛОКАЛЬНОЇ СТАЦІОНАРНОСТІ

Один з наведених методів КА на інтервалах локальної стаціонарності описаний в роботі [3]. Цей метод заснований на виборі інтервалу локальної стаціонарності, що є сумою послідовних, однакових за тривалістю, елементарних стаціонарних інтервалів випадкового сигналу. При цьому передбачається, що всередині елементарного інтервалу сигнал завжди стаціонарний. Умови вибору локально-стаціонарних інтервалів для такого методу, який можна назвати методом крокового вікна, записуються так:

$$\forall D, m, \Theta \left(\bigcap_{r=1}^k \left(\left(\left| \hat{D}_r - D_{eff} \right| \leq \varepsilon_D \right) \wedge \left(\left| \hat{m}_r - m_{eff} \right| \leq \varepsilon_m \right) \right) \right) \\ \vdash \left(\Theta_A = \sum_{r=1}^k \Theta_r \right) \cup \\ \left(\bigcup_{r=1}^k \left(\left(\left| \hat{D}_r - D_{eff} \right| > \varepsilon_D \right) \vee \left(\left| \hat{m}_r - m_{eff} \right| > \varepsilon_m \right) \right) \right) \vdash \\ \vdash \left(\left(\Theta_A = \sum_{r=1}^{k-1} \Theta_r \right) \cap \left(\Theta_{uf} = \Theta_k \right) \right), \quad (1)$$

де $\Theta_A \subset \Theta_\Sigma$, Θ_Σ — тривалість всієї реалізації ВП, Θ_A — поточний сумарний інтервал аналізу, Θ_r — r -й елементарний інтервал аналізу, що складається з N_{el} відліків, $\vdash$ — знак секвенції, ε_m , ε_D — допустимі відхилення середнього та дисперсії, причому

$$\hat{m}_r = \frac{1}{N_{el}} \sum_{i=r+1}^{r+N_{el}} x_i, \quad \hat{D}_r = \frac{1}{N_{el}-1} \sum_{i=r+1}^{r+N_{el}} (x_i - m_r)^2 = \sigma_r^2,$$

а перший інтервал аналізу приймається за початковий довірчий інтервал $\Theta_{uf} = \Theta_1$.

Для довгих часових рядів описаний метод є ефективним та забезпечує просту апаратну реалізацію спецпроцесорів для КА. Однак для коротких часових рядів такий підхід є не достатньо точним, оскільки може привести до суттєвої втрати статистики. Автори цієї статті пропонують новий метод вибору інтервалу локальної стаціонарності, що базується на пересуванні елементарного інтервалу і перевірці умов стаціонарності з кожним відліком (метод ковзного вікна). При такому методі інтервал стаціонарності формується першим елементарним інтервалом в поточному інтервалі локальної стаціонарності і черговими відліками, які не порушують умов стаціонарності. Такий підхід дозволяє максимально використовувати статистичні дані. Формула (2) описує новий алгоритм вибору інтервалу локальної стаціонарності на основі методу ковзного вікна

$$\forall D, m, \Theta \left(\bigcap_{r=1}^k \left(\left(\left| \hat{D}_r - D_{eff} \right| \leq \varepsilon_D \right) \wedge \left(\left| \hat{m}_r - m_{eff} \right| \leq \varepsilon_m \right) \right) \right) \\ \vdash \left(\Theta_A \in [(i+1)T, (k+n-1)T] \right) \cup \\ \left(\bigcup_{r=i+1}^k \left(\left(\left| \hat{D}_r - D_{eff} \right| > \varepsilon_D \right) \vee \left(\left| \hat{m}_r - m_{eff} \right| > \varepsilon_m \right) \right) \right) \vdash \\ \left(\Theta_A \in [(i+1)T, (k+n-2)T] \wedge \Theta_{uf+1} \in [kT, (k+n-1)T] \right), \quad (2)$$

де $r, k = i+1, \dots, N-n+1$, n — довжина вікна аналізу, $N = \text{ENT}(\Theta/T)$ — число відліків, що аналізуються (повна довжина часового ряду), $i \in [1, N-n+1]$ — номер поточного інтервалу, що визначається його першим елементом, а дисперсії рівні відповідно:

$$D_r = \frac{1}{n-1} \sum_{a=r}^{r+n-1} (x_a)^2$$

і для i -го інтервалу локальної стаціонарності

$$D_{nfi} = \frac{1}{n-1} \sum_{a=i}^{i+n-1} (\dot{x}_a)^2,$$

причому перший довірчий інтервал рівний $\Theta_{nfi} \in [T, nT]$.

ПОРІВНЯННЯ РОЗГЛЯНУТИХ МЕТОДІВ

При порівнянні (1) та (2) видно, що метод (2) на основі вікна, яке рухається з дискретністю одного відліку, дозволяє розширити інтервал локальної стаціонарності додатково на величину від 1 до $N_{el} - 1$ відліків, в залежності від розташування вікна.

Порівняння обох методів здійснюємо шляхом визначення відхилення дисперсії на основі виразу

$$|\delta D_{xx}^{(iN_{el}+j)}| = \frac{|D_{xx}^{(iN_{el}+j)} - D_{xx}^{(iN_{el})}|}{D_{xx}^{\Sigma}},$$

де $iN_{el} + j$ – номер поточного відліку, що аналізується, $j = 1, \dots, N_{el} - 1$; i – число проаналізованих елементарних інтервалів, D_{xx}^{Σ} – дисперсія сигналу на повному інтервалі реалізації.

Для дослідження впливу втрати статистики при методі крокового вікна визначалась залежність похибки обчислення від тривалості інтервалу локальної стаціонарності при заданому N_{el} . В даному прикладі розглядався стаціонарний сигнал у вигляді рожевого шуму в смузі частот від 0 до 300 Гц, дискретизований з частотою 600 Гц. На рис. 1 показані ці похибки в залежності від довжини локально-стаціонарного часового ряду при різних значеннях N_{el} .

З рис. 1 видно, що при довжинах часових рядів, кратних N_{el} , похибка рівна нулю, оскільки в цьому випадку в обох алгоритмах статистичні дані однакові. В решті випадків похибки є помітними на коротких інтервалах локальної стаціонарності і швидко зменшуються із збільшенням довжини цих інтервалів. Розглянуті похибки також суттєво залежать від довжини елементарного інтервалу, причому із зменшенням N_{el} та i вони збільшуються.

СТРУКТУРА АДАПТИВНОГО КОРЕЛЯТОРА

Запишемо алгоритм визначення різниць між середніми $\bar{x}_r$, $\bar{x}_{nfi}$ на поточному та довірчому інтервалах, а також між відповідними дисперсіями D_r та D_{nfi} , які необхідні для знаходження локально-стаціонарних інтервалів реалізації. Для середнього на

i -му довірчому інтервалі маємо

$$\bar{x}_{nfi} = \frac{1}{n-1} \sum_{a=i}^{i+n-1} x_a, \quad (3)$$

а на поточному інтервалі

$$\bar{x}_r = \frac{1}{n-1} \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a, \quad (4)$$

при цьому $n = \text{const}$.

З (3) та (4) знайдемо

$$\begin{aligned} \bar{x}_{nfi} - \bar{x}_r &= \frac{1}{n-1} \sum_{a=i}^{i+n-1} x_a - \frac{1}{n-1} \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a = \\ &= \frac{1}{n-1} \left(\sum_{a=i}^{i+n-1} x_a - \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a \right) \propto \sum_{a=i}^{i+n-1} x_a - \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a \end{aligned} \quad (5)$$

З (5) видно, що для визначення різниць достатньо порівняти лише суми.

Аналогічно запишемо для дисперсій:

$$\begin{aligned} D_{nfi} &= \frac{1}{n-1} \sum_{a=i}^{i+n-1} x_a^2 - (\bar{x}_{nfi})^2 \\ D_r &= \frac{1}{n-1} \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a^2 - (\bar{x}_r)^2 \end{aligned}$$

При $\bar{x}_r = \bar{x}_{nfi}$ різниця дисперсій пропорційна різниці таких сум:

$$D_{nfi} - D_r \propto \sum_{a=i}^{i+n-1} x_a^2 - \sum_{a=r}^{r+n-1} x_a^2. \quad (6)$$

На основі (5) та (6) визначаємо інтервал локальної стаціонарності.

Структура корелятора, що реалізує алгоритм з ковзним вікном, показана на рис. 2.

Корелятор складається з двох частин. Перша частина, робота якої базується на обчисленні різниць (5) та (6) і порівнянні їх з заданими відхиленнями ϵ_x та ϵ_D відповідно, забезпечує вибір ділянок локальної стаціонарності та керування корелятором загалом.

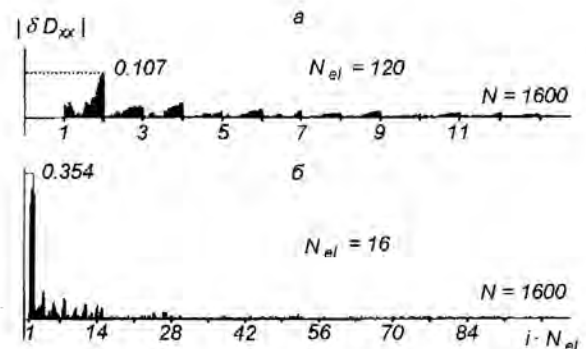


Рис. 1. Похибка дисперсії, що обумовлена втратою статистики

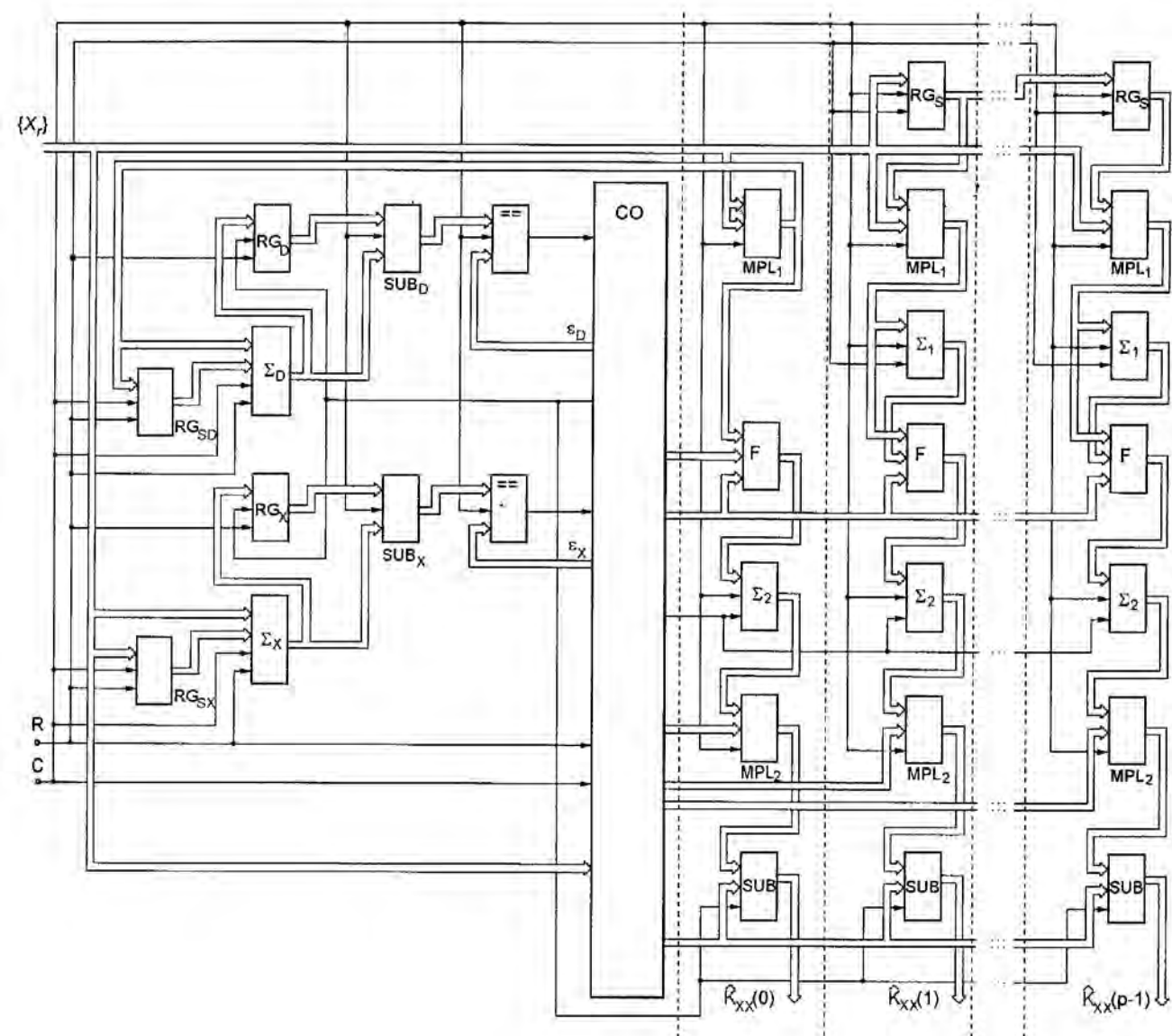


Рис. 2. Адаптивний корелятор

Друга частина є спеціалізованим P -канальним процесором, що обчислює кореляційну функцію для часових зсувів $m = 0, \dots, P - 1$.

Перша частина містить два регістри зсуву RG_{SD} та RG_{SX} , два регістри RG_D та RG_X , два акумулятори (суматори з нагромадженням) Σ_D та Σ_X , два субтрактори SUB_D та SUB_X , два компаратори та блок керування CO.

Кожен з каналів $m = 0, \dots, P - 1$ спецпроцесора містить регістр зсуву RG_S , два перемножувачі

MPL_1 та MPL_2 , шинний формувач F , два акумулятори Σ_1 та Σ_2 і субтрактор SUB . В першому каналі ($m = 0$) на відміну від решти відсутній регістр зсуву RG_S та акумулятор Σ_1 .

Адаптивний корелятор працює наступним чином.

В момент появи сигналу починається його обробка на першому елементарному інтервалі, який стає довірчим інтервалом для першої локально-стаціонарної ділянки. Сумування з нагромадженням $\sum_{a=1}^{n-1} x_a^2$ та $\sum_{a=1}^{n-1} x_a$, де x_a — відлік сигналу, здійс-

нюється в акумуляторах Σ_D та Σ_X відповідно. Одночасно починається робота спецпроцесора, в кожному з P каналів якого вираховується оцінка кореляційної функції для відповідного часового зсуву m , який забезпечується регістрами зсуву RG_S . Добуток $x_n x_{n-m}$ формується в перемножувачах MPL_1 і нагромаджується в акумуляторах Σ_2 . Паралельно сума $\sum_{a=1}^{n-m} x_a x_{a-m}$ нагромаджується в акумуляторах

Σ_1 . Останні, працюючи за принципом кільцевого стеку на відміну від акумуляторів Σ_2 , постійно містять $n+r-m$ останніх добутоків, де r — кількість відліків, на яку зсунулось вікно. Вони необхідні для корекції результатів обчислень при появі нової нестационарної ділянки. Протягом формування першого довірчого інтервалу на входи віднімання акумуляторів Σ_D та Σ_X надходять нулі, оскільки затримка регістрів зсуву RG_{SD} та RG_{SX} дорівнює часу елементарного інтервалу. При закінченні формування першого довірчого інтервалу блок керування генерує тактовий сигнал і сума відліків, яка нагромаджена в акумуляторах Σ_D та Σ_X , переписується в регістри RG_D та RG_X і зберігається там до закінчення стаціонарної ділянки. При кожному тактовому імпульсі, що надходить на вхід С корелятора, в перемножувачах MPL_2 визначається добуток значення нагромадженого в акумуляторах Σ_2 та коефіцієнта $(n+r-m)^{-1}$. А на відповідному виході блоку керування СО встановлюється коректований коефіцієнт $\bar{x}_A^2$, де $\bar{x}_A$ — середнє значення сигналу на інтервалі аналізу, який використовується лише в момент закінчення стаціонарної ділянки.

Наступний за довірчим інтервалом відлік та його квадрат додаються до вмісту акумуляторів Σ_D та Σ_X , а перший відлік та його квадрат, затримані у регістрах зсуву RG_D та RG_X відповідно, віднімаються від вмісту цих акумуляторів. Тобто сумування з нагромадженням в акумуляторах Σ_D та Σ_X можна записати у вигляді $\sum_{a=r}^{r+n-1} x_a^2$ та $\sum_{a=r}^{r+n-1} x_a$ відпові-

дно. Вміст цих акумуляторів подається на входи відповідних субтракторів SUB_D та SUB_X , в яких він віднімається від вмісту відповідних регістрів RG_D та RG_X . Згідно з цим визначаються різниці (6) та (5). Отримані різниці порівнюються з допустимими значеннями в компараторах і результати подаються на відповідні входи блоку керування СО, який приймає рішення про стаціонарну ділянку процесу. Якщо рішення позитивне, то описана вище процедура повторюється знову.

Якщо прийняте рішення про вихід процесу за межі стаціонарності, то на тактовому виході блоку

керування з'являється відповідний сигнал і вміст акумуляторів Σ_D та Σ_X переписується в регістри RG_D та RG_X відповідно. Отже, ділянка реалізації, яка перекривається в даний момент вікном, стає новим довірчим інтервалом. Цей тактовий сигнал є командою до здійснення віднімання в субтракторах SUB і на інформаційних виходах корелятора $\hat{K}_{xx}(m)$ з'являються значення кореляційної функції для відповідних часових зсувів:

$$\hat{K}_{xx}(m) = \frac{1}{N_A - m} \sum_{a=1}^{r+n-1-m} x_a x_{a+m} - (\bar{x}_A)^2,$$

де $N_A = r + n - 1$ — інтервал аналізу. Одночасно шинні формувачі F переводяться в третій стан, а акумулятори Σ_2 очищаються. Після цього в акумулятори Σ_2 через шинні формувачі F переписуються значення, нагромаджені в акумуляторах Σ_1 , забезпечуючи таким чином переривання попередньої та початок наступної ділянки локальної стаціонарності. В першому каналі ($m = 0$) відсутня затримка, тому на другий вихід шинного формувача система керування подає пульсове значення. Після цього шинні формувачі F повертаються у вихідне положення, тобто його перший вхід з'єднується з виходом. Надалі робота корелятора не відрізняється від описаної для першої локально-стаціонарної ділянки. Для переривання обробки однієї реалізації та початку обробки іншої в кореляторі передбачено вхід скидання R , який з'єднаний з входами скидання відповідних елементів.

ВИСНОВКИ

При порівнянні розглянутих методів можна зазначити, що вони обидва забезпечують КА в реальному часі. Метод крокового вікна (1) потребує меншого обсягу обчислень, однак він не забезпечує повного використання доступних статистичних даних. В багатьох випадках, особливо на довгих часових рядах, цей метод достатньо ефективний. Його недоліки проявляються лише на коротких інтервалах локальної стаціонарності. В цьому випадку кожен додатковий відлік сигналу збільшує статистику і відповідно точність кореляційного аналізу.

Метод ковзного вікна (2) добре пристосований до обробки коротких часових рядів. Він забезпечує повне використання статистичних даних і постійну затримку обчислень, що не перевищує Θ_A (без урахування часу перетворення), але вимагає більшого обсягу обчислень і складнішої апаратури.

Вибір того чи іншого методу залежить лише від

особливостей випадкових сигналів та конкретних вимог до економічності бортової апаратури.

1. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.
2. Погрибной В. А. Бортовые системы обработки сигналов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.
3. Погрибной В. А., Рожанковский И. В., Джыцимски З., Собульски А. Адаптивный корреляционный анализ локально-стационарных случайных процессов // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. — 1996. — № 5. — С. 24 — 32.
4. Яглом А. М. Кореляционная теория стационарных случайных функций. — Л.: Гидрометеониздат, 1981. — 216 с.

ADAPTIVE CORRELATIONAL ANALYSIS OF LOCAL-STATIONARY CASUAL SIGNALS FOR ONBOARD EXPERIMENTS

V. O. Pohribnyi, A. Sobulskyi, I. V. Rozhankivskyi, Ya. V. Hren', and Z. Dzycimskyi

We present an adaptive algorithm for real-time calculation of correlation functions with a sliding window for stationarity analysis. This window moves with a one-sample discreteness. The stationarity analysis of a casual process consists in the comparison of means and variances of the process on the current analysis interval and the current confidential interval. Variance errors for the algorithms with a crossbar window and a sliding window are compared. Block diagram of an adaptive on board correlator is presented.

УДК 519.681.5 + 681.142.4

Організація обчислень, керованих потоками даних для бортової обробки інформації в реальному часі

Б. Я. Олексів

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Розглядаються проблеми організації обчислень в багатопроцесорних системах, керованих потоками даних. Описуються підсистема проектування мікропрограмних модулів, а також розроблена система програмування, яка включає мову високого рівня FPL, транслятор, систему налаштування та синтезу багатопроцесорних бортових систем.

ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

Розробка інформаційних технологій багатопроцесорних систем конвеєрного типу функціонування та нейронних мереж, асоціативних і самоорганізовуваних систем є одним з важливих і перспективних напрямків розвитку сучасної інформатики. До числа першочергових задач, які розв'язують з допомогою таких систем, відносяться задачі аналізу і розпізнавання нечислових даних, дослідження і вивчення нервової системи людини, створення моделей функціонування і відтворення живої природи, штучного інтелекту, створення банків знань, експертних систем.

Разом з тим засоби традиційних нейманівських і навіть паралельних систем не адекватні переліченим проблемам. Це зумовлено перш за все тим, що швидкодія окремих пристроїв в цих системах наближається до своєї природної межі, обумовленої швидкістю світла.

Проте розвиток технології надвеликих інтегральних схем (НВІС) сприяв значному зменшенню вартості обладнання, і можливо, скоро можна буде включати в конструкцію необхідну кількість елементів для розв'язку достатньо великих задач. Для повного використання переваг НВІС необхідно максимально використовувати апаратуру, що в ній міститься. Це, у свою чергу, стимулює створення

нових методів та апаратних і програмних засобів моделювання і обробки інформації.

Отже, актуальність проблеми даного проекту визначається трьома взаємопов'язаними факторами:

- необхідністю розв'язання задач реального часу, які не розв'язуються, або незадовільно розв'язуються іншими засобами;
- актуальними потребами розвитку сучасних засобів обробки інформації, для яких властивий масовий паралелізм, мікромініатюризація та наявність елементів штучного інтелекту;
- потребами вивчення природних механізмів мислення.

Особливістю даного напрямку робіт є те, що, з одного боку, для ефективного використання нових обчислювальних структур необхідним є як ґрунтовний теоретичний аналіз їх роботи, так і потужний інструментарій програмних та апаратних засобів. З іншого боку, актуальною є розробка нових засобів навчання самоорганізовуваних систем для побудови нейронних мереж на базі нових технологій.

На даний час для розвитку нових інформаційних технологій, моделювання та синтезу обчислювальних систем проводяться інтенсивні теоретичні і прикладні дослідження. В них значна увага надається теоретичним аспектам функціонування і моделювання обчислювальних структур та розпара-

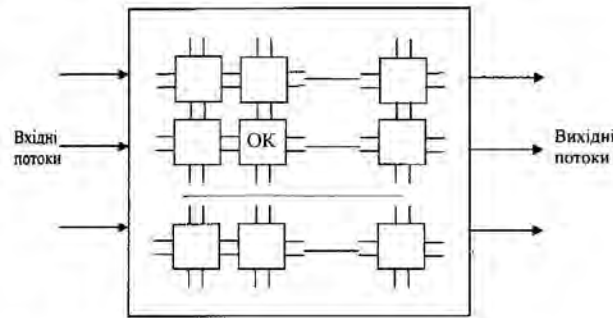


Рис. 1. Матриця однорідних процесорів ОК

лелювання алгоритмів на них. Ці підходи значною мірою лягли в основу концепції обчислювальних машин п'ятого покоління.

Існують також роботи, в яких розглядалися інформаційні технології синтезу засобів керування системними обчислювальними середовищами [2, 3]. Ці роботи завершилися створенням різних версій інструментарію програмних та апаратних засобів розв'язку задач великої розмірності. Проте загального підходу до налаштування та моделювання обчислювальних процесів на базі мультиконвеєрних систем (МКОС) типу однорідних обчислювальних середовищ (ООС) це розроблено. Зауважимо, що МКОС ООС мають багато спорідненого з нейроподібними мережами.

Нами розглядається МКОС, яка складається з матриць однорідних процесорів (ОК) [6] (рис. 1). Підключення джерел і приймачів потоків даних в таких системах реалізується через пристрої узгодження з використанням, при необхідності, буферних запам'ятовуючих пристроїв. В МКОС передача інформації між ОК здійснюється через регістри комутаційні канали, просуванням за один такт на одну комірку середовища і передачею інформації одній або декільком сусіднім коміркам. Процеси налаштування і роботи матриці ОК розділені в часі. Спочатку формується потік команд для налаштування ООС, далі цей потік команд засилається в регістри команд (РК) кожної ОК. В результаті МКОС буде налаштована на виконання заданого алгоритму і підготовлена до роботи. Процес переналаштування обчислювального середовища на реалізацію іншого алгоритму полягає у формуванні нового потоку команд налаштування, який наново необхідно заслати в РК ОК. Після цього при поступанні потоків даних на бортову обчислювальну систему починається реалізація нового обчислювального алгоритму.

В даній роботі описується розв'язок задач, вирішення яких є необхідною умовою ефективної орга-

нізації обчислювального процесу на бортових космічних системах поточного типу. Серед них описуються методи проектування модулів для ООС та інструментальні засоби програмування і автоматизованого налаштування бортових обчислювальних систем. В статті розвивається новий підхід до організації обчислень в багатопроцесорних системах, керованих потоками даних.

МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛІВ ДЛЯ ООС

Проектування мікропрограмних модулів. Автоматизований синтез мультиконвеєрних обчислювальних структур (МКВС) на однорідних обчислювальних середовищах (ООС) здійснюється при наявності базового набору мікропрограмних модулів (МПМ), налаштованих на виконання необхідних елементарних операцій. Через те, що обчислювальні комірки (ОК) [6] ООС працюють синхронно, то всі дані в МКВС мають однакову періодичність. Обчислювальний процес організований так, що дані поступають у вигляді потоків з фіксованим періодом і відділяються один від одного нульовим (буферним) розрядом.

Для обнулення буферного розряду та виділення необхідних розрядів операндів використовуються різні константи.

При ручному налаштуванні ООС ефективніше генерувати константи поза МПМ і подавати в модулі при необхідності окремим потоком. Тоді один раз згенерована константа використовується всіма МПМ при налаштуванні поля ООС. Але тоді всі МПМ повинні мати додаткові входи для констант, що суттєво ускладнює задачу автоматизованого налаштування ООС, бо із збільшенням числа вхідних потоків МПМ виникає проблема їх синхронізації. Автоматизована синхронізація потоків веде до значного збільшення неефективного використання комірок поля ООС.

В даній статті розглядається генерація МПМ з внутрішньою константою. Задача генерації МПМ з внутрішньою константою повністю не вирішує проблеми синхронізації роботи різних МПМ, тому що необхідно, щоб потік операндів був узгоджений з фазою константи всередині МПМ. Але ця задача суттєво простіша, ніж синхронізація додаткового потоку зовнішніх констант. Таким чином, використання внутрішніх констант спрощує процес синхронізації в різних МПМ, ефективний при автоматизованому налаштуванні ООС.

Нижче описані алгоритми і наведені функціональні схеми базових МПМ з внутрішніми константами для 8-розрядних операндів. Розробка ана-



Рис. 2. Прийняті позначення

логічних МПМ для операндів більшої розрядності принципових труднощів не викликає.

Алгоритми функціонування базових МПМ з внутрішніми константами. Додавання чисел в модифікованому додатковому коді (МДК). Числа A і B додаються порозрядно з переносом. Потім буферний розряд очищається.

Віднімання чисел в МДК. В алгоритмі віднімання двох чисел A і B використовується переведення числа B в додатковий код і додавання даного числа до числа A . Відомо, що $B_{\text{дод}} = B + 1$. В схемі реалізована еквівалентна формула $A - B = (A + B) + 1$. Після кожної операції алгебраїчного додавання буферний розряд очищають, щоб не було спотворень наступного двійкового числа.

Множення чисел в МДК. Реалізовано метод з використанням множення в прямому коді з переводом операндів в прямий код, а результату — в МДК. Через те, що при множенні n -розрядних операндів розрядність результату становить $2n$, то для того, щоб запобігти спотворенню результатів, вхідний потік штучно роздвоюється.

Після цього над кожним потоком проводяться наступні операції:

- перевід чисел із МДК в прямий, визначення знаку добутку, виділення абсолютної величини множників;
- множення в прямому коді. Всі розряди одного множника помножуються на фіксований розряд другого множника, одержані часткові добутки сумуються із зсувом. Сегмент містить стільки вертикальних стовбців, скільки двійкових розрядів має абсолютна величина множника;
- аналіз результатів множення на переповнення, переведення результатів в МДК і формування n -розрядного коду. При переповненні в МДК

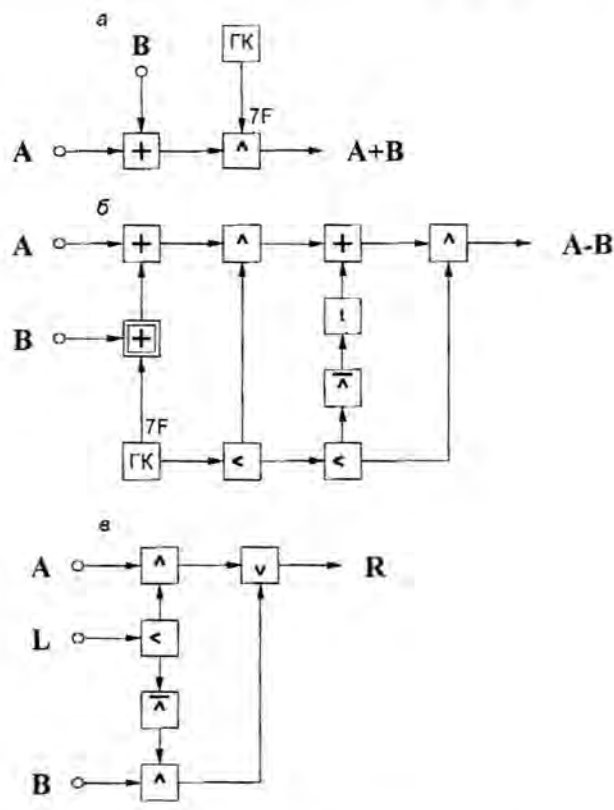


Рис. 3. Функціональні схеми МПМ-додавання (а), віднімання (б), вибору потоку (в)

формуються різні знакові розряди, які ідентифікують некоректність результату.

Вихідний потік формується злиттям одержаних паралельних потоків.

Алгоритм роботи МПМ вибору потоку. МПМ вибору потоку використовується для реалізації обчислень умовних виразів. Модуль має три вхідних потоки: (A, B) — операнди, L — логічний. «1» в логічному потоці означає, що відповідний розряд результуючого потоку R містить розряд операнда A , в протилежному випадку — операнда B . Таким чином, МПМ реалізує логічну функцію $R = (A \cap B) \cup (B, L)$.

Приклади функціональних схем базових МПМ. Умовні позначення, прийняті в наведених нижче функціональних схемах, показані на рис. 2. На рис. 3 і 4 зображені функціональні схеми МПМ, необхідні для синтезу на ООС нейронних елементів.

Імітатор ООС. Імітація роботи ООС дозволяє програмними засобами перевірити правильність функціонування автоматизованої системи налаштування ООС. Імітатор ООС використовується для

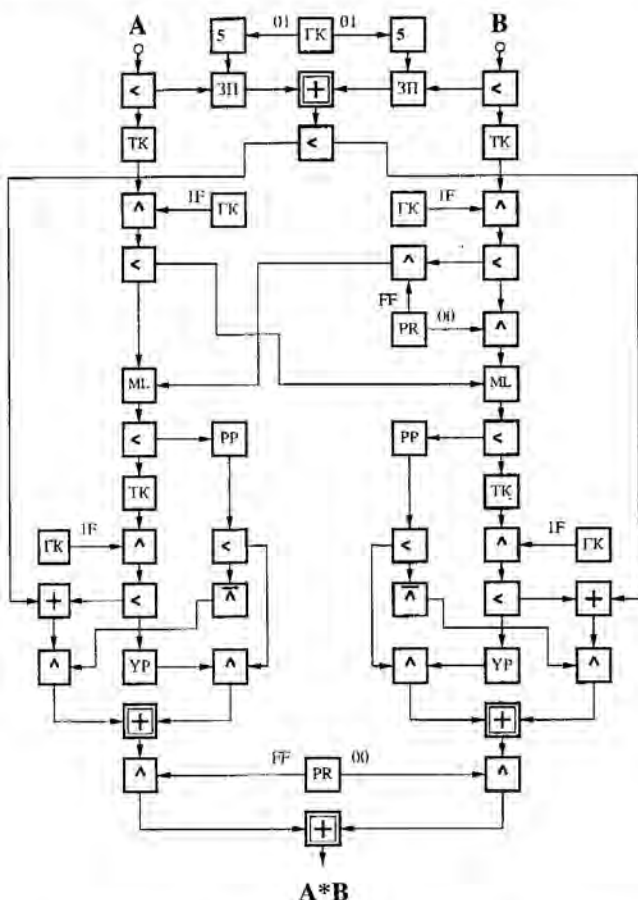


Рис. 4. Функціональна схема МПМ-множення: ТК — перевірка мантий числа з модифікованого доповнюючого коду в прямий і навпаки, ПР — перемикач для розпаралелювання, МЛ — множення 8-розрядних чисел в прямому коді, ПР — аналіз результату на наявність переповнення, УР — формування результату множення при виникненні переповнення

відладки МПМ, налаштованих на виконання фундаментальних операцій (арифметичні операції, порівняння, селекція потоків і т. д.).

Імітатор працює з полем ОК заданої розмірності $H \times L$. Кожна ОК середовища попередньо налаштовується на виконання певних операцій, які виконуються при подачі зовнішнього імпульсу, і в процесі роботи не переналаштовуються.

Функціонування ВК визначається регістром команд $R_{i,j}$ ($i = 1, \dots, H$; $j = 1, \dots, L$) розміром 2 байти. Внутрішній стан кожної комірки характеризується байтом стану S . Нехай S_k означає k -й біт байта S (0-й біт — молодший). Тоді S_k ($k = 0, \dots, 3$) — біти вихідної інформації, де містяться результати операцій ОК, які поступають на кожну з чотирьох сусідніх комірок; S_7 — біт затримки результату операції; S_5 — біт затримки транзиту; S_6

— використовується для запису «1» при виконанні комірною операції «запис одиниці», або для запам'ятовування «1» переносу при виконанні операції додавання.

Біт S_7 не використовується.

Стан і регістр команд ОК змінюються дискретно при поступанні тактового імпульсу. З урахуванням описаних вище позначень функціонування ООС можна описати формулою, яка визначає залежність стану комірки в момент T від стану в момент $T-1$.

$$(R[i, j]; S[i, j]) = f(R[i, j]; S_0[i, j+1], S_1[i+1, j], S_2[i, j+1], S_3[i-1, j], S_4[i, j], S_5[i, j], S_6[i, j]).$$

Стан поля ООС в кожний момент може бути визначений на основі попереднього стану і зовнішньої інформації, яка подається на входні комірки ООС. На кожному такті з заданих входних комірок можна одержати вихідну інформацію, яка є результатом роботи алгоритму, реалізованого на даній ООС.

Алгоритм роботи імітатора. Алгоритм складається з наступних кроків.

1. Зчитування параметрів ООС з зовнішнього файлу.
2. Формування потоку інформації, яка поступає на входи МПМ.
3. Ввід координат потоку інформації, ознаки напрямку виходу потоку з комірки, початкового такту виводу інформаційного потоку.
4. Обнулення початкових станів комірок.
5. Обчислення числа тактів, необхідного для завершення імітації.
6. Визначення нових станів комірок поля ООС в залежності від їх стану на попередньому такті.
7. Зчитування інформації на виходах МПМ і в контрольних точках.
8. Якщо задача імітації не закінчена, то переходимо до кроку 6.
9. Вивід інформації на виходах МПМ і в контрольних точках.

Вихідна інформація для роботи алгоритму імітації, яка вводиться в діалоговому режимі, містить ім'я файлу опису МПМ, розрядність оброблюваної інформації, число і координати контрольних точок.

Дані в файлі опису МПМ мають таку структуру:

- ідентифікатор МПМ;
- розміри матриці МПМ;
- число входів і виходів МПМ;
- регістри команд ОК;
- координати входів і виходів МПМ.

Інформація, яка поступає на входи МПМ і зчитується з їх виходів і в контрольних точках, може

бути представлена послідовністю символів «0» і «1» або в десятковій системі числення, в залежності від призначення імітатора.

ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ПРОГРАМУВАННЯ І НАЛАШТУВАННЯ ООС

Розпаралелювання. Нехай $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ множина операцій алгоритму, який складається з послідовно виконуваних дій, які не містять циклів. Внутрішня структура такого алгоритму повністю описується його інформаційним графом $G(A, \Gamma)$ [5], де A — скінченна множина елементів, що відповідають операціям вихідної програми, які називаються вершинами, а Γ — бінарне відношення, задане на A . При цьому $a_i \in \Gamma a_j$ ($a_1, \dots, a_n \in A$) в тому випадку, коли результат операції a_j є аргументом операції a_i . Це означає, що існує дуга напрямлена з вершини a_j до вершини a_i .

Розпаралелювання, при такому поданні алгоритму, є задачею розбиття вершин інформаційного графу $G(A, \Gamma)$ на множини Ω_i , які задовольняють умови

$$\Omega_i \neq \emptyset, \Omega_i \cup \Omega_j = \emptyset \ (i \neq j), \bigcup_i \Omega_i = A, \quad (1)$$

$$\Omega_i \subseteq \Gamma \Omega_j \ (i > j). \quad (2)$$

Умова (2) означає, що для кожної операції $a_i \in \Omega_i$ знайдеться операція $a_j \in \Omega_j$, $s > 1$ і при цьому $a_i \in \Gamma a_j$, тобто вершина інформаційного графу $G(A, \Gamma)$, яка належить ярусу s і залежить хоча б від однієї вершини ярусу $s-1$.

В умовах (1), (2) Ω_0 — множина операцій, яка залежить тільки від вихідних даних. Результати виконання нульового ярусу є вихідними даними для операцій першого ярусу і т. д. Такий запис алгоритму називається ярусно-паралельною формою Поспелова [7].

Нами розглядається багатопроцесорна обчислювальна система, що складається з матриць однорідних процесорів [6]. Для програмування таких систем нами була розроблена мова програмування високого рівня FPL [4].

На етапі програмування багатопроцесорної системи засобами мови FPL описуються потоки трьох типів: вхідні потоки даних (EntryFlow), внутрішні потоки (FlowData, Buffer) і вихідні потоки (LogoutFlow). Це основні потоки системи. На етапі трансляції і розпаралелювання FPL-програми основні потоки деталізуються і доповнюються проміжними потоками. До них відносяться зовнішні розщеплені потоки, потоки — результати операцій попереднього рівня ярусно-паралельної форми

(ЯПФ), потоки — результати операцій утворення нового потоку в системі («вентиль») і потоки — результати вибору гілки умовного оператора («селектор»). Номери (адреси) основних потоків формуються при трансляції FPL-програми, а проміжних — на етапі побудови ЯПФ. Проміжні потоки даних характеризуються тими самими атрибутами, що і основні потоки і відрізняються від них тільки обмеженням «часом життя» в системі. Побудова ЯПФ здійснюється з дотриманням принципу неперервності потоків: проміжний потік, що виник на даному рівні ЯПФ, може брати участь в операціях, починаючи з її наступного рівня. Виникнувши, проміжний потік існує в системі в одинарному або в розщепленому вигляді до того часу, поки він і всі його гілки, якщо вони є, не візьмуть участі у відповідних операціях на наступних рівнях. Після цього проміжний потік зникає.

Розглянемо детальніше атрибути потоків даних, побудову графу потоків даних та розпаралелювання FPL-програми. Граф потоків даних FPL-програми в ЕОМ представляється масивом записів Attribute. Характеристики рівня ЯПФ описуються списком Base. Кількість елементів у цьому списку дорівнює кількості рівнів ЯПФ. Кожен елемент списку містить номер рівня nl , довжину рівня ll та кількість розгалужень br на ньому. Кожен рівень ЯПФ FPL-програми складається з ll записів масиву Attribute. У свою чергу, кожен з цих записів містить всі необхідні для реалізації паралельних обчислень атрибути потоків даних. Серед них такі: $NumF$ — номер (адреса) потоку;

Opr — операція, в якій бере участь потік з номером $NumF$;

Tf — тип потоку в ярусно-паралельній формі. Для реалізації обчислень методом потоків даних в ЯПФ розрізняються сім типів потоків, які описуються перелічуванням типом $Rang$;

Li — номер гілки потоку на даному рівні. Для нерозщепленого потоку номер гілки дорівнює нулю;

Aj — адреса переходу. Цей атрибут використовується у вузлах операції для реалізації в ЯПФ умовних виразів. Для потоків даних цей параметр дорівнює нулю;

Mir — уявність потоку. В моделі паралельних обчислень, яка описується в даній статті можуть існувати потоки дійсні («true») та уявні («false»). Потоки даних EntryFlow, Buffer і проміжні потоки завжди є дійсними. Потоки даних FlowData і LogoutFlow на початку побудови ЯПФ є уявними і стають дійсними в результаті операції утворення потоку.

Крім потоків даних в ЯПФ містяться також вуз-

ли операцій. Вузли операцій описуються тими самими атрибутами, що і потоки даних. Параметри $NumF$, Tf і Li для вузлів операцій завжди дорівнюють нулю і $Mir = false$. В атрибут Opr вузла операцій записується номер операції, а в Aj — індекс елемента ЯПФ, де закінчується дія умовного виразу. Для арифметичних виразів атрибут Aj вузла операцій дорівнює нулю.

Ознакою кінця поточного рівня ЯПФ є запис

$$\begin{aligned} <NumF = 0, Opr = 0, Tr = 0, \\ Li = 0, Aj = 0, Mir = false>. \end{aligned} \quad (3)$$

Необхідною і достатньою умовою спонтанного виконання операцій (арифметичних, логічних, утворення потоку) є існування такої трійки елементів ЯПФ (два потоки даних і один вузол операції), для якої виконуються наступні умови:

$$\begin{aligned} <NumF_1 \neq 0, NumF_2 \neq 0, NumF_3 = 0> \\ <Opr_1 = Opr_2 = Opr_3 \neq 0> \quad (4) \\ <Mir_1 = true, Mir_2 = true, Mir_3 = false>. \end{aligned}$$

Для спонтанної реалізації «селектор» необхідним і достатнім є існування на даному рівні подібної п'ятірки елементів. У цьому випадку до умови (4) додаються ще два елементи адресів закінчення на даному рівні ЯПФ гілок умовного виразу.

В запропонованій моделі обчислень в багатопроцесорній системі, керованій потоками даних, паралелізм, який міститься в програмі, реалізується ознаками (3) і (4) природним чином без явного виділення паралельних ділянок. Причому, в даній схемі досягається абсолютно максимальне розпаралелювання в сенсі В.О.Вальковського [1].

Налаштування. Алгоритм налаштування лінійних ділянок програми. Лінійна ділянка програми складається з декількох арифметичних виразів. При налаштуванні однорідного обчислювального середовища (ООС) [6] на реалізацію лінійних ділянок програми провадиться розпаралелювання операцій, які входять в різні арифметичні вирази даної ділянки. Перед налаштуванням ООС будується ЯПФ лінійних ділянок програми. На початку налаштування ООС вводяться всі глобальні змінні, які входять в арифметичні вирази.

На першому рівні провадиться налаштування всіх операцій, операндами яких є глобальні змінні, що подаються ззовні. На наступних рівнях виконуються операції, входами яких є глобальні змінні і результати операцій попередніх рівнів.

При налаштуванні ООС на обчислення лінійних виразів використовується така інформація: розряд-

ність використовуваних мікропрограмних модулів, номер рівня налаштування, довжина рівня (кількість потоків на даному рівні), атрибути потоків змінних.

Налаштування ООС здійснюється за рівнями. Після введення інформації про даний рівень проводиться обробка його потоків і налаштування на виконання операцій на даному рівні.

На кожному рівні переглядаються потоки за видами. Якщо у виразі є операція на першому рівні, то знаходимо кількість глобальних змінних, які беруть участь в цьому виразі і використовуються більше ніж один раз. Ці змінні розгалужуються для їх дальшого використання.

Якщо модуль використовує тільки зовнішні потоки, то він розміщується біля лівого краю плати ООС. Якщо в модулі використовуються потоки, які виходять з попереднього модуля, то модуль розміщується справа від попереднього. Принциповим є те, що вихід потоків з попереднього модуля розміщується зліва, а вхід в даний модуль — справа.

При перегляді номерів вхідних потоків другого і наступних рівнів перевіряємо їх відповідність з номерами вихідних потоків попереднього рівня. При відповідності номерів сусідніх рівнів вхідні потоки трасуються і синхронізуються.

Якщо вхідним потоком є результат виразу попереднього рівня, то цей потік трасується, розгалужується, якщо в цьому є необхідність (потік використовується більше одного разу). Розгалуження здійснюється шляхом використання транзиту з двома виходами. Один вихід використовується в даному МПМ, координати і такт другого виходу запам'ятовуються для подальшого використання на наступних рівнях.

Переглядаючи вирази, в яких є операції на даному рівні, розпізнаємо арифметичні операції. За кодом операції звертаємося до бібліотечних МПМ і налаштуємо ООС на виконання цих модулів.

При налаштуванні другого і наступних рівнів інформаційні потоки можуть виявитися не в тому порядку, в якому вони необхідні при їх подачі в МПМ. Тому проводиться їх переміщення зверху вниз і знизу доверху. Це робиться за допомогою обчислювальної комірки з операцією «розширений транзит».

Після трасування потоків здійснюємо їх синхронізацію при вході в МПМ. Задача синхронізації полягає в вирівнюванні всіх потоків на потрібну різницю тактів, потрібну для подачі в МПМ.

При налаштуванні рівня знаходимо кількість виразів, налаштування яких закінчене на даному рівні, резервуємо для них траси. В них розгалужуємо

потоки результатів виразів для їхнього дальшого використання.

Потоки, які не використовуються в даному модулі, виводяться на ліву межу даного модуля без синхронізації. Канали зв'язку цих потоків проходять нижче від модуля, який розглядається.

Після закінчення налаштування ООС на обчислення лінійної ділянки програми запам'ятовуються координати і такти вихідних потоків, розміри поля ООС, номери стрічок подачі вхідних потоків, масив інформації налаштування обчислювальних комірок ООС.

Умовні вирази. При розв'язанні більшості задач виникає необхідність організації гілок обчислень для реалізації деяких частин алгоритму. Звертання до тієї чи іншої гілки програми здійснюється з допомогою команд умовного і безумовного переходів. При цьому, якщо виконується відповідна умова, обчислення йде по заданій гілці, а по інших гілках воно не відбувається. При налаштуванні ООС команди умовного переходу не можна поставити у відповідність визначений модуль. В цьому випадку для реалізації команди умовного переходу необхідно провести розкладку модулів для всіх гілок програми. Ця обставина знижує ефективність використання однорідних середовищ при реалізації в ній програми, в якій є умовні переходи.

Приклад. Застосування розробленого інструментарію для моделювання нейронного елемента засобами ООС.

Допускається, що нейронний елемент реалізує деяку функцію, яка «приймає рішення» відносно подальшого проходження сигналу на основі одержаних вхідних сигналів. Спектр можливих функцій досить широкий. Найпростіша порогова функція має вигляд

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq p \quad (5)$$

і приймає значення 1 або 0, в залежності від того, перевищує значення зваженої суми величину порогу P , чи ні. В загальному випадку це може бути довільна монотонна дійсна функція, яку називають функцією стиску або функцією активації нейрона.

Традиційні схеми обчислень при навчанні і функціонуванні нейронних мереж та інших близьких до них структур не передбачають будь-якого фіксованого порядку обробки елементів. Тому обчислення задаються в непроцедурній формі. При програмній реалізації обчислення, як правило, проводяться в послідовному режимі. При апаратній реалізації витягується природний паралелізм, який має місце між перцептронами, що знаходяться на одному рівні. В запропонованих підходах та

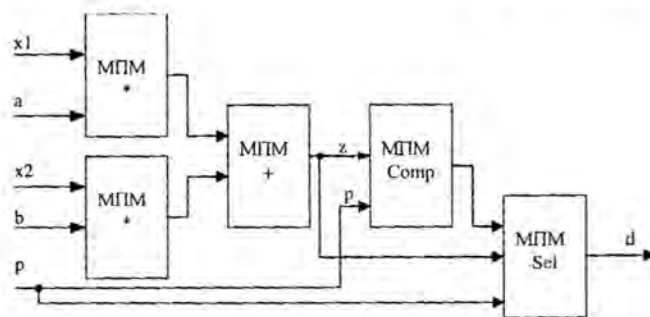


Рис. 5. Структурна схема синтезованого двохвходового нейрона

розробленим інструментарієм обчислення в ООС організовуються методом потоків даних, так що паралелізм, як на внутрішньо-нейронному, так і на міжнейронному рівнях витягується природним чином, без явного вказування паралельних ділянок програми. Для збереження наглядності нижче наведена програма, розроблена автором мовою програмування для моделювання засобами ООС двохвходового нейрона з вагами.

FPL — програми моделювання нейронного елемента на ООС.

cap 8;

Entry $a, b, x1, x2, p$;

Flow z ;

Logout d ;

begin

$z := a * x1 + b * x2$;

$d := \text{if } z \geq p \text{ then } z \text{ else } 0$;

end.

Структурна схема синтезованого нейрона показана на рис. 5.

Параметри синтезованого нейрона: кількість рядків комірок ООС — 45, кількість стовпців — 20, ЯПФ синтезованого нейрона складається з чотирьох рівнів. Кількість активних потоків за рівнями, враховуючи розгалуження: перший рівень — 6 потоків, другий — 4, третій — 4, четвертий — 3 потоки.

Оптимізація при налаштуванні лінійних ділянок програми. При оптимізації процесу налаштування ООС на обчислення арифметичних виразів визначається номер рівня максимальної довжини L . На цьому рівні знаходимо операції, які виконуються не раніше як на $L + 2$ -му рівні. Якщо такої операції на даному рівні немає, то шукаємо наступний номер рівня максимальної довжини. Якщо L є передостаннім рівнем, то послідовно переносимо на наступний рівень операції, починаючи з останньої операції L -го рівня.

Після знаходження номера рівня з максималь-

ним числом операцій визначаємо можливість переносу операції з даного рівня на нижчі рівні до рівня, на якому використовується результат даної операції.

Переноси операцій з верхніх рівнів на нижчі починаються з останньої операції. Процес оптимізації побудови ЯПФ є ітераційним і, кількість ітерацій залежить від заданої ширини ЯПФ.

ВИСНОВКИ

В статті розроблено методи проєктування модулів та інструментальні засоби програмування і розпаралелювання алгоритмів в багатопроцесорних системах на основі запропонованого опису властивостей потоків даних. Описано імітатор багатопроцесорних систем потокової дії. Встановлено принципи неперервності потоків даних, який застосовується для побудови та аналізу ЯПФ представлення алгоритму. Встановлено умови включення потоку в операцію на заданому рівні ЯПФ. Розпаралелювання алгоритмів, що при цьому досягається відповідає абсолютно-максимальному розпаралелюванню [1]. Описано розроблений алгоритм налаштування багатопроцесорних систем типу однорідних обчислювальних середовищ з елементами оптимізації, яку доцільно використовувати при обмеженій ширині налаштовуваного обчислювача. Розроблені засоби дозволяють автоматично синтезувати бортові спецпроцесори, проблемно-орієнтовані обчислювальні середовища в реальному часі та нейронподібні середовища. Результати роботи можуть стати основою також для створення спеціалізованих стендів програмування, налаштування і відлагодження бортових космічних систем.

1. Вальковский В. А. Распаралеливание алгоритмов и программ. Структурный подход. — М.: Радио и связь, 1989. — 176 с.
2. Голиченко Е. П., Костив Ю. В., Фурдило А. И., Шмойлов В. И. Программирование однородных вычислительных сред. Методические рекомендации для программистов. — Львов, 1989. — 51 с.
3. Грицык В. В., Слуцкий Ю. Н. Распаралеливание и настройка в сложных системах параллельной обработки информации. — Львов, 1981. — 78 с.
4. Олексів Б. Я. Розробка інформаційних технологій налаштування високопродуктивних обчислювальних систем на базі однорідних обчислювальних середовищ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Львів, 1994. — 23 с.
5. Параллельная обработка информации: В 3 т. — Киев: Наук. думка, 1985. — 280 с. — Т. 1: Распаралеливание алгоритмов обработки информации / Под ред. А. Н. Свенсона.
6. Параллельная обработка информации: В 3 т. — Киев: Наук. думка, 1986. — 288 с. — Т. 3: Вычислительные системы структуры и среды для решения задач большой размерности / Под ред. В. В. Грицыка.
7. Поспелов Д. А. Введение в теорию вычислительных систем. — М.: Сов. радио, 1972. — 280 с.

ORGANIZATION OF DATAFLOW-CONTROLLED CALCULATIONS FOR ONBOARD REAL-TIME INFORMATION PROCESSING

B. Ya. Oleksiv

Organization of dataflow-controlled calculations for onboard real-time information processing is discussed. A subsystem was developed for designing microprogram modules (MPM) for the homogeneous computing medium (GCM). This subsystem includes also an imitator of the GCM. A few samples of the MPM functional schemes are given. The method of paralleling algorithm for multiprocessor computing system was worked out on the basis of the dataflow properties. The conditions for the onset of dataflow at a definite level of the level-parallel form are determined. The adjusting algorithm of flow activity multiprocessor system based on the homogeneous computing medium with the elements of optimization was developed and realized in a program form.

УДК 621.376.56

Бортова інформаційна система для дослідження потоків часток в навколоземному просторі

В. О. Погрібний^{1, 3}, І. В. Рожанківський², С. А. Таянов²

¹Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

²Державний Університет «Львівська політехніка», Львів

³Інститут Телекомунікації Сільськогосподарсько-технічної академії, Бидгощ, Польща

Надійшла до редакції 13.04.98

Бортова інформаційна система СТЕП-Е призначена для ідентифікації, вимірювання енергії та визначення просторово-часових характеристик енергійних частинок магнітосфери та космічного простору. Вона працює разом із телескопічними детекторами, які встановлюються ззовні супутника. В результаті обробки сигналів давачів виявляються нестационарності потоків у вигляді різких змін інтенсивності потоку в порівнянні з середньою інтенсивністю, а також досліджуються стохастичні зв'язки між інтенсивностями випадкових потоків частинок і параметрами електричних і магнітних полів за допомогою крос-кореляційного аналізу.

ВСТУП

Проблема вивчення впливу сейсмічної активності Землі на її іоносферу та магнітосферу є актуальною як в фундаментальному, так і в прикладному аспектах. Ці дослідження мотивовані необхідністю пошуку тих явищ в іоносфері та магнітосфері, які можуть випереджати активну стадію землетрусів, що дуже важливо для комплексного вирішення питання про прогнозування землетрусів. Вивчення ж сейсмо-іоносферно-магнітосферних зв'язків за допомогою штучних супутників Землі дозволяє вести регулярні спостереження глобального масштабу.

Встановлено, що відгуки хвильових та корпускулярних складових магнітосфери несуть інформацію про землетруси. Однією з таких складових є захоплені та висиплені з радіаційних поясів Землі енергійні частинки: електрони, протони та альфа-частинки.

У ході різноманітних космічних експериментів з дослідження характеристик потоків енергійних частинок, зокрема з допомогою магнітного спектрометра «Марія» на орбітальній станції «Салют-7» у

1985 р. [9], магнітного спектрометра-телескопа на орбітальній станції «Мир» в 1987 р. [1–3], комплексу наукової апаратури «Електрон» на борту штучного супутника Землі «Метеор-3» в 1985–1986 рр. [7], виявлена просторова і часова кореляція між змінами інтенсивності потоків високоенергійних заряджених частинок і землетрусами. Це дає можливість розробити надійний метод короткотермінового прогнозування землетрусів.

Метою запланованого космічного експерименту «Попередження» є перевірка можливості короткотермінового прогнозу сейсмічної активності методом одночасного спостереження потоків захоплених і висиплених з радіаційних поясів Землі енергійних електронів, протонів і альфа-частинок. Такі спостереження будуть здійснюватись за допомогою розробленої авторами інформаційної системи СТЕП-Е, яка призначена для обробки сигналів двох ідентичних блоків давачів потоків енергійних частинок. Блоки давачів у вигляді телескопічних детекторів встановлюватимуться ззовні космічного апарата, а система СТЕП-Е — всередині об'єкта. Блок давачів складається з двох матричних напів-

провідникових кремнієвих детекторів D1 та D2 та двох сцинтиляційних детекторів D3, D4 з кристала CsJ(Tl). Матричні кремнієві детектори призначені для ідентифікації частинок та визначення напрямку їх приходу. Сцинтиляційний детектор D3 дає можливість одержувати енергетичні спектри в широкому діапазоні, а D4 дозволяє визначати інтегральні спектри найбільш енергійних частинок, що перетнули усі попередні детектори D1, D2, D3.

Нижче розглядаються особливості функціонування та побудови системи СТЕП-Е.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДАВАЧІВ

Складність визначення параметрів та обробки сигналів давачів потоків енергійних частинок обумовлена, насамперед, накладанням сусідніх імпульсних сигналів, нестационарністю потоків частинок та специфікою знаходження кореляційних зв'язків між імпульсними потоками та неперервними сигналами, які надходять від давачів електричних та магнітних полів.

При розробці системи обробки сигналів СТЕП-Е використані запропоновані авторами методи корекції накладань імпульсів, визначення інтенсивностей нестационарних потоків енергійних частинок та знаходження кореляційних зв'язків між параметрами імпульсних потоків та електричних і магнітних полів.

Для усунення накладань імпульсів, які надходять від давачів потоків енергійних частинок, авторами запропонований алгоритм автоматичної корекції цих накладань [8]. Алгоритм полягає у запам'ятовуванні та відніманні від амплітуди накладеного імпульсу його п'єдесталу, що сформований попереднім імпульсом. Точність запропонованого методу не залежить від форми зрізу попереднього імпульсу, що суттєво спрощує реалізацію пристрою автоматичної корекції накладань.

Наступний метод стосується аналізу інтенсивності потоку $\lambda(t)$, яка є одним з найважливіших параметрів потоку і визначається як відношення числа зареєстрованих частинок або відповідно імпульсів до часового інтервалу аналізу. Для потоків енергійних частинок характерна постійність інтенсивності $\lambda(t) = \text{const}$ на довгих складових інтервалах реалізації θ_i . На коротких інтервалах аналізу інтенсивності можуть бути не однакові й суттєво відрізнятися від середньої інтенсивності $\lambda(t)$ в повному інтервалі θ_E [4]. Однак такі нестационарні послідовності імпульсів є найбільш інформативними при дослідженні навколосемного середовища. В залежності від процесів у навколосемному просторі

може мати місце різке збільшення інтенсивності $\lambda_i(t) \gg \lambda(t)$ на окремих інтервалах аналізу, що носять назву мікросплеск інтенсивності, або її спад $\lambda_i(t) \ll \lambda(t)$ (бухта інтенсивності) [6]. Мікросплески і бухти інтенсивності пропонується визначати наступними умовами: якщо

$$\lambda_i^{(+)}(t) \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}, \quad K^{(+)} > 1,$$

то таке перевищення розцінюється як мікросплеск інтенсивності, якщо

$$\lambda_i^{(-)}(t) \leq K^{(-)} \overline{\lambda(t)}, \quad K^{(-)} < 1,$$

то це бухта інтенсивності. Тут $K^{(+)}$, $K^{(-)}$ — априорно задані коефіцієнти.

При аналізі інтенсивності потоків виникає питання вибору тривалості інтервалів аналізу та середньої інтенсивності. Пропонуємо вибирати останню з попередньої реалізації випадкової послідовності імпульсів такої ж загальної тривалості θ_E :

$$\overline{\lambda(t)} = N_\theta(t) / \theta_E,$$

де $N_\theta(t)$ — число імпульсів, підраховане протягом попереднього інтервалу θ_E реалізації.

При відсутності даних про зв'язок $\lambda(t)$ з числом мікросплесків або бухт, i -й інтервал аналізу $\theta_i(t)$ доцільно визначати сумою випадкових інтервалів часу (пауз) Δt_m між імпульсами, число $N_c = \text{const}$ яких вибирається априорно, виходячи з характеру послідовності:

$$\theta_i = \sum_{m=1}^{N_c} \Delta t_m. \quad (1)$$

Таким чином, інтервал $\theta_i(t)$ починається від моменту появи останнього імпульсу $(i-1)$ -го інтервалу аналізу і триває до моменту появи N_c -го імпульсу. Для цього випадку поточна інтенсивність набуває вигляду

$$\lambda_i(t) = N_c / \theta_i(t).$$

Окрім аналізу інтенсивності на інтервалах $\theta_i(t)$, для визначення мікросплесків і бухт пропонується аналізувати інтенсивність на коротких інтервалах аналізу τ . При цьому на інтервалах τ визначається поточна інтенсивність

$$\lambda_i^{(\tau)} = N_i^{(\tau)} / \tau,$$

де $N_i^{(\tau)}$ — кількість імпульсів, які прийшли за час τ .

Для зменшення масиву даних, що передаються бортовою телеметрією та несуть інформацію про інтенсивність, пропонуємо застосувати екстремальний аналіз. При цьому запам'ятовуються тільки інтервали аналізу з мінімальними і максимальними

значеннями поточної інтенсивності. Умова максимуму інтенсивності на i -му інтервалі:

$$(\lambda_i > \lambda_{i-1}) \wedge (\lambda_i > \lambda_{i+1}) \wedge (|\lambda_{i+1} - \lambda_i| > \delta),$$

де δ — апріорно вибране значення в залежності від сигналу і вимог до точності.

Умова мінімуму на i -му інтервалі:

$$(\lambda_i < \lambda_{i-1}) \wedge (\lambda_i < \lambda_{i+1}) \wedge (|\lambda_{i+1} - \lambda_i| > \delta).$$

Після цього формується масив значень інтенсивності в екстремальних точках λ_i та інтервалів часу, коли вона вимірюється. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити масив даних при малих похибках перетворення, коли відсутні короткочасні різкі зміни інтенсивності. В цьому випадку інтервали аналізу інтенсивності доцільно вибирати достатньо широкими, тобто виходячи з умови (1).

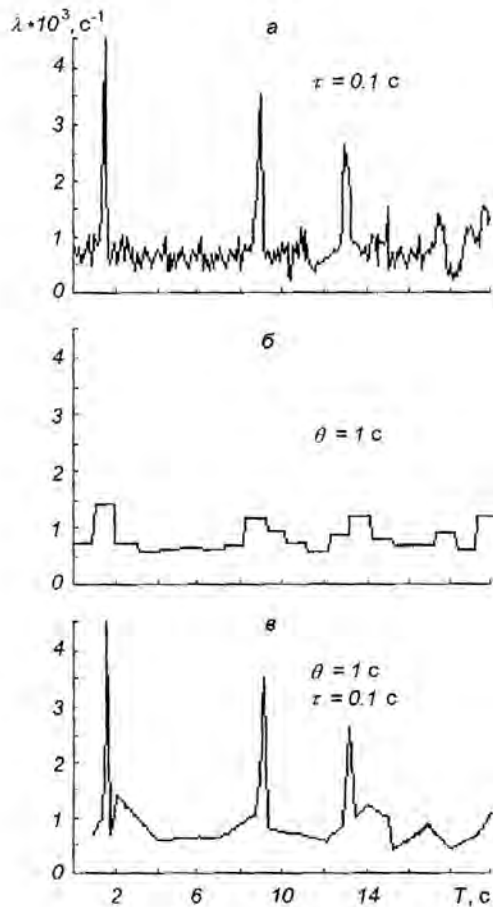


Рис. 1 Залежність інтенсивності від часу: а — виміряна під час космічного експерименту САМБО-79; б — перетворена при збільшеному інтервалі; в — перетворена за допомогою екстремального аналізу і лінійної інтерполяції

При наявності різких змін інтенсивності розглянутий метод дає велику похибку перетворення, аж до втрати інформації про мікросплески та бухти. Щоб не допустити втрати інформації і одночасно зменшити масив переданих телеметриєю даних, пропонуємо такий підхід. За допомогою екстремального аналізу на коротких інтервалах τ запам'ятовуються тільки початкові, максимальні (мінімальні) та кінцеві значення мікросплесків (бухт) і моменти часу їх появи. Вершина мікросплеску $\lambda_i^{(\tau)}$ визначається з допомогою екстремального аналізу за критерієм

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_i^{(\tau)} > \lambda_{i-1}^{(\tau)}) \wedge (\lambda_i^{(\tau)} > \lambda_{i+1}^{(\tau)}).$$

Початок і кінець мікросплеску визначається наступними умовами. Якщо

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) < K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_{i+1}^{(\tau)} \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}),$$

то $\lambda_i^{(\tau)}$ — початкове значення мікросплеску, а якщо

$$(\lambda_i^{(\tau)}(t) < K^{(+)} \overline{\lambda(t)}) \wedge (\lambda_{i-1}^{(\tau)} \geq K^{(+)} \overline{\lambda(t)}),$$

то $\lambda_i^{(\tau)}$ — кінцеве значення.

Бухти визначаються аналогічно. На основі цього формується масив початкових, екстремальних та кінцевих значень мікросплесків і бухт та часових інтервалів, на яких вони спостерігаються. До нього додається масив даних усереднених інтенсивностей на довгих інтервалах аналізу $\theta_i \gg \tau$ та формується загальний масив «інтенсивність—час».

Перевірка запропонованого методу здійснювалася шляхом імітаційного моделювання на прикладі залежності інтенсивності від часу, яка була отримана під час космічного експерименту САМБО-79 для частинок з енергією $E > 35$ КєВ (рис. 1, а). Тут досліджуваний масив даних становить 200 значень інтенсивності, тривалість інтервалу вимірювання якої була задана достатньо малою ($\tau = 0.1$ с) для виявлення мікросплесків та бухт інтенсивності. На рис. 1, б зображена ця ж залежність при збільшенні інтервалу вимірювання до $\theta_i = 1.0$ с, в результаті чого кількість значень інтенсивності зменшилася до 20. В цьому випадку досягається суттєвий стиск даних, які передаються через бортову телеметрію, однак втрачається інформація про мікросплески та бухти. На рис. 1, в показані результати перетворення вихідної залежності із застосуванням екстремального аналізу та збільшення інтервалів вимірювання інтенсивності з наступною лінійною інтерполяцією отриманих значень. Тут $\theta_i = 1.0$ с, $\tau = 0.1$ с, $K^{(+)} = 2$, $K^{(-)} = 0.5$, кількість значень інтенсивності 29. Необхідно за-

уважити, що повний масив даних, які необхідно передати бортовою телеметрією, збільшується на число значень часових параметрів мікросплесків та бухт (для розглянутого прикладу їх 9). З рис. 1, а видно, що запропоновані методи дають можливість зменшувати кількість переданих даних та не втрачати при цьому інформацію про мікросплески та бухти інтенсивності потоку часток.

Тепер перейдемо до розгляду методу знаходження кореляційних зв'язків інтенсивностей потоків частинок з параметрами інших неперервних сигналів. Для цього пропонується початково дискретизовану залежність інтенсивності перетворити в неперервну шляхом лінійної інтерполяції, а потім результат інтерполяції знову дискретизувати, але з рівномірною частотою дискретизації. Частота дискретизації вибирається з умови

$$f_{di} \geq 2 / \theta_{min},$$

де θ_{min} — мінімальний інтервал часу вимірювання інтенсивності. Після цього для усунення впливу високочастотних складових застосовується фільтрація низьких частот.

Для згладження коливань Гіббса, які виникають в результаті зрізання безмежної імпульсної характеристики фільтра, потрібно використовувати згладжуваче вікно (Хеммінга, Кайзера і т. п.) [5]. Похибку фільтрації мінімізуємо, використовуючи відповідні типи адаптації. Отриманий продискретизований з рівномірною частотою f_{di} сигнал є придатним для подальшого дослідження за допомогою будь-яких методів обробки неперервного сигналу.

Для визначення стохастичного зв'язку зміни електричного поля навколо Землі зі зміною інтенсивності потоку частинок доцільно використовувати крос-кореляційний аналіз. Для цього спочатку слід вибрати частоту дискретизації f_d обох сигналів. Будемо знаходити її з умови

$$f_d \geq \max[f_{di}, f_{dE}],$$

де f_{dE} — частота дискретизації неперервного сигналу (виходячи з частоти Найквіста).

Тоді крос-кореляційна функція сигналів інтенсивності і напруженості електричного поля для додатніх та від'ємних часових зсувів запишеться у вигляді:

$$K_{\lambda E}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \lambda_k E_{k+m},$$

$$K_{\lambda E}(-m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \lambda_{k+m} E_k,$$

де N — число відліків масиву даних, що відповідають напруженості електричного поля або інтенсивності потоку, λ_k та E_k — відліки інтенсивності

та напруженості в k -й момент часу, $m = 0, \dots, P$ — часові зсуви крос-кореляційної функції. Зв'язок зміни магнітного поля з інтенсивністю потоку часток досліджується аналогічно.

Результати моделювання підтвердили доцільність визначення кореляційних зв'язків між інтенсивностями потоків та енергетичними параметрами електричних та магнітних полів за допомогою розробленої методики.

СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ СТЕП-Е

Запропоновані методи обробки імпульсних потоків реалізовані в інформаційній системі СТЕП-Е, яка, окрім визначення просторово-часових та енергетичних характеристик частинок, забезпечує обмін даними з бортовою телеметрією та автоматичне тестування на борту.

Система включає в себе два аналізатори імпульсів та блок живлення. Аналізатори мають ідентичну будову і призначені для обробки даних двох блоків давачів енергійних частинок СТЕП-D1 та СТЕП-DII та видачі результатів обробки на бортову телеметрію. Окрім цього, аналізатори формують тестові сигнали для перевірки детекторів.

Аналізатор імпульсів (рис. 2) містить три пристрої попередньої обробки Y1, Y2, Y3, арифметично-логічний пристрій ALU, дешифратор DC, процесор CPU, генератор тактових імпульсів G, інтерфейс зв'язку з штатною телеметрією, інтерфейс зв'язку з системою збору наукової інформації та інтерфейс формування каліброваних імпульсів. Останні три пристрої зображені на рис. 2 одним блоком ST. Перші два пристрої попередньої обробки Y1 та Y2 мають ідентичну будову. На рис. 2 показаний також один із блоків давачів СТЕП-D1, який складається з чотирьох детекторів D1...D4.

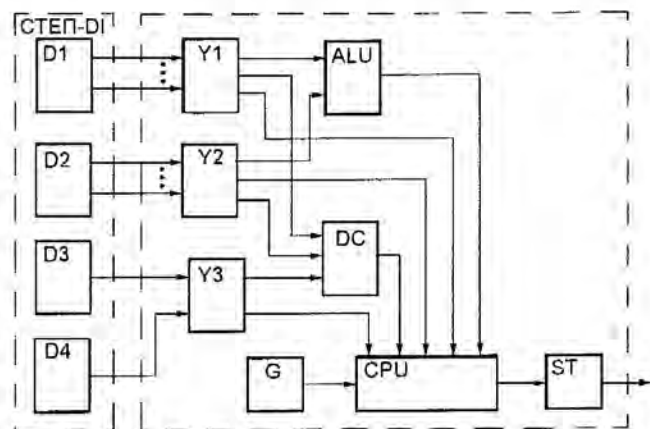


Рис. 2. Аналізатор імпульсів

Аналізатор імпульсів працює наступним чином. Пристрої Y1, Y2 перетворюють сигнали детекторів D1, D2 в дворозрядний двійковий код, що відповідає типу частинки, та п'ятирозрядний двійковий код, що відповідає номеру комірки давача, в яку попала енергійна частинка. Пристрої Y3 запам'ятовує максимальне значення імпульсного сигналу на виході детектора D3, яке відповідає енергії частинки. Далі з допомогою аналого-цифрового перетворювача цей сигнал перетворюється в п'ятирозрядний двійковий код.

Арифметично-логічний пристрій ALU на основі інформації про номери комірок, через які пройшла енергійна частинка в детекторах D1 та D2, визначає номер тілесного кута прильоту цієї частинки. Дешифратор DC на основі аналізу подій визначає номер детектора, до якого долетіла заряджена частинка, що для детекторів D1, D2, D4 відповідає номеру енергетичного діапазону відповідної частинки. Для детектора D3 номер енергетичного діапазону визначається з допомогою аналого-цифрового перетворювача.

На процесор CPU подається інформація про тип частинки (з виходів пристроїв Y1 та Y2), про номер тілесного кута (з виходу ALU) та про номер енергетичного діапазону (з виходів дешифратора DC та пристрою Y3). Через кожні 2.5 с процесор формує повідомлення (інформаційні кадри) про результати вимірювань (енергетичні спектри частинок та кутовий розподіл). При формуванні повідомлень для зменшення кількості передаваних даних використовуються алгоритми екстремального аналізу, наведений вище.

Для визначення мікросплесків та бухт інтенсивності інтервали нагромадження тривалістю 2.5 с додатково розбиваються на коротші інтервали. Мікросплески визначаються шляхом порівняння середньої інтенсивності за час 2.5 с з локальними інтенсивностями на коротших проміжках часу.

Запропоновані методи кореляційного аналізу використовуються при обробці даних на землі.

ВИСНОВОК

Наведені в даній роботі нові методи дозволяють визначати характеристики потоків енергійних частинок у випадку змінної інтенсивності та визначати стохастичні зв'язки між інтенсивностями потоків енергійних частинок та електричними і магнітними полями.

1. Воронов С. Ф., Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г. и др. Регистрация возрастания потоков высокоэнергичных частиц в районе БМА 10 сентября 1985 г. // Космич. исследования. — 1989. — 27, № 4. — С. 629.
2. Воронов С. Ф., Гальпер А. М., Колдашев С. В. и др. Возрастания потоков заряженных частиц высоких энергий в области БМА и сейсмичность Земли // Космич. исследования. — 1990. — 28, № 5. — С. 789.
3. Гальпер А. М., Дмитриенко В. В., Никитина Н. В. и др. Взаимосвязь высокоэнергичных заряженных частиц в радиационном поясе с сейсмичностью Земли // Космич. исследования. — 1989. — 27, № 4. — С. 789.
4. Лазутин Л. Л., Хрущинский А. А. Пульсирующие высыпания энергичных электронов в авроральной зоне // Энергичные частицы в авроральной магнитосфере. — Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1977. — С. 74–93.
5. Опенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов. — М.: Связь, 1979. — 416 с.
6. Погрибной В. А. Бортовые системы обработки сигналов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.
7. Пустоветов В. П., Малышев А. Б. Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космич. исследования. — 1993. — 31, № 5. — С. 84.
8. Pogribnyi V., Rozhankivsky I., Zelinski I., et al. Programable system for measurement and processing of the sensor signals of particles fluxes in space plasma / PDS'98. — Gliwice, 1998. — P. 337–343.
9. Voronov S. A., Galper A. M., Kirillov-Ugriyomov V. G., et al. Registration of sporadic increase of high energy particle flux near Brazilian anomaly region // Proc. 20-th Int. Cos. Ray Conf. — 1987. — Vol. 4. — P. 451.

ONBOARD INFORMATION SYSTEM FOR THE INVESTIGATION OF PARTICLE FLUXES IN THE CIRCUMTERRESTRIAL SPACE

V. O. Pohribnyi, I. V. Rozhankivskyi,
and S. A. Taianov

The onboard information system STEP is intended for the identification, energy measurements, and determination of space-time characteristics particles in the magnetosphere and open space. It operates together with telescopic detectors which are installed outside a satellite. Processing of detector signals of energetic reveals that the fluxes are non-stationary — the flux intensities vary about drastically the average intensity. Stochastic relationships between the intensities of casual particle flows and the parameters of electric and magnetic fields are studied with the use of cross-correlation analysis.

УДК 681.32:528.533

К проблеме использования клеточных автоматов в качестве космических бортовых вычислительных устройств

В. А. Вальковский, Д. Д. Зербино

Научно-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Обговорується можливість застосування в космічних бортових системах обробки інформації та управління клітинних автоматів спеціалізованої архітектури. Особливості пристроїв, які використовують клітинні автомати — це регулярність структури, висока надійність, можливість нарощування, взаємозамінність універсальних модулів та нагромадження, масовий паралелізм в обробці інформації і висока швидкодія. Запропоновані системи володіють підвищеною надійністю, яка виражається в можливості їх функціонування в умовах відмови деяких комірок. Наведені приклади арифметичних клітинних автоматів для реалізації алгоритмів над комплексними числами. Розглядаються питання незалежності результатів обчислень від порядку застосування правил автомата.

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении проблемы оснащения космических аппаратов бортовыми компьютерами с необходимостью приходим к следующим требованиям для них. Во-первых, они должны быть компактны по объему и иметь небольшой вес. Во-вторых, быть надежными относительно сбоев, особенно тех, которые присущи космической среде. В-третьих, быть «адекватными решаемым задачам». Последнее выражается в их узкой специализации как по архитектуре, так и по типам обрабатываемых данных. Например, при решении двумерных задач, представляющих большую часть всей нагрузки на бортовые компьютеры, необходимо быстро оперировать с комплексными числами.

Общепризнанно, что среди наиболее подходящих типов вычислителей, удовлетворяющих этим требованиям, важное место занимают клеточные автоматы [3]. Клеточные автоматы на плоскости представляют собой однородную ячеистую среду, преобразование информации в которой ведется по некоторым локальным правилам. Правила применя-

ются параллельно и независимо. Таким образом, клеточный автомат осуществляет асинхронную распределенную обработку информации.

Клеточные автоматы подходят для решения как «внешних», так и «внутренних» задач. Под первыми подразумеваются те задачи, ради решения которых был запущен космический аппарат. Типичный пример — обработка космических снимков в реальном масштабе времени. «Внутренние» задачи — это те задачи, которые решаются в целях жизнеобеспечения и оптимизации использования оборудования самого космического аппарата. Среди них можно рассмотреть усовершенствование подсистемы ориентации солнечных батарей корабля на солнце. Очевидно, что как одна из важнейших подсистем она должна быть абсолютно надежной, а также компактной и не зависеть от маневров, выполняемых самим кораблем. Кроме того, в ее функции должны входить не только ориентация плоскостей батарей, но и коммутация отдельных их фрагментов в общую цепь с целью максимальной энергоотдачи, диагностика повреждений, прогноз старения и загрязненности элементов, паразити-

ваемость. Клеточный автомат легко допускает расширение и замену фрагментов, а также остается работоспособным при отказе некоторых из его частей. Это структура, которая может быть «распределена» по всей плоскости солнечной батареи, а на борт корабля, параллельно с подачей электроэнергии, передавать сигналы для управления ориентацией батареи и данные в бортовой компьютер о состоянии каждого ее элемента.

Таким образом, клеточный автомат как специализированное вычислительное устройство удовлетворяет всем условиям, накладываемым на бортовой компьютер.

Однако, помимо специфических операций, обработка информации на борту космического устройства требует выполнения определенного количества традиционных арифметических действий. Это, например, нахождение взвешенной суммы при решении задачи цифровой фильтрации, которая является неотъемлемой частью решения проблемы анализа изображений, или расчет направления поворота антенны. Таким образом, возникает проблема выбора: либо «порции» необходимых арифметических вычислений отправлять на Землю, либо оснащать космическое устройство дополнительным специпроцессором для выполнения в реальном времени необходимых арифметических операций, либо попытаться приспособить для их выполнения имеющийся на борту специализированный процессор, в нашем случае — клеточный автомат.

В настоящей работе предлагается подход, ориентированный на последнюю из перечисленных возможностей [2]. Более точно, в рамках достаточно традиционной модели клеточного автомата предлагается некоторая система правил и «стратегия» их применения, позволяющая реализовать арифметические операции средствами того же самого специализированного устройства, которое предназначено для решения типовых «внешних» и «внутренних» задач. При этом нами показана корректность использования этих правил, возможность их применения в поле комплексных чисел, а также надежность использования клеточных автоматов в условиях выхода из строя некоторых ячеек.

Предлагаемая модификация формализма клеточных автоматов, характеризуется включением в нес ряд простых правил глобального характера. Это приближает ее к понятию ассоциативной памяти, что позволяет унифицированными средствами реализовать более широкий класс вычислительных операций. При одном и том же наборе правил и типе кодирования, меняя области ввода и вывода информации, а также осуществляя небольшое число подготовительных и глобальных управляющих дей-

ствий, удастся добиться реализации принципиально различных арифметических операций.

В отличие, например, от [1], наш подход ориентирован на применение в космической среде. Мы используем несколько иные асинхронные правила, не зависящие от контекста. Особое внимание уделяется инвариантности получаемых результатов от хода поступления входной информации. Кроме того, полученные результаты не зависят от разрядности, а при вычислениях дается возможность сохранять все значения цифры результата.

БАЗОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ

В работе используется традиционное понятие однослойного клеточного автомата на плоскости с измерениями i и j . Пара (i, j) обозначает клетку с координатами i, j . Клетка может содержать значение 0 или 1. Запись $([k : l], [m : n])$ идентифицирует прямоугольник в вычислительном поле. Некоторые из значений k, l, m, n могут быть $-\infty$ или $+\infty$, т. е. минус бесконечность и бесконечность. Если $k = l$ или $m = n$, то пишется одно из этих значений, а двоеточие и квадратные скобки опускаются. Таким образом, $([-\infty : 1], 2)$ обозначает бесконечную влево линию ячеек, идущую на уровне 2 от ячейки $(1, 2)$. В целях повышения надежности все вычисления четырехкратно дублируются: выполняются в каждом из четырех квадрантов плоскости.

С помощью приведенных выше соглашений локализуем области ввода операндов ARG1 и ARG2 той или иной операции, область вывода результата RESULT, а также области действия вспомогательных и управляющих операций.

Нами используются два бесконтекстных правила обработки в вычислительном поле автомата (рис. 1).

Правила будем называть перекрывающимися в ячейке (i, j) , когда (i, j) можно изменить одновременно по нескольким из них. Если какие-либо правила перекрываются, то в каждый момент времени можно выполнить только одно из них. Если правила не перекрываются, то их можно выполнять одновременно.

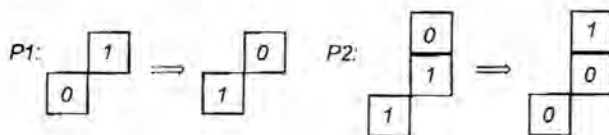


Рис. 1. Система правил для классической двоичной системы кодирования

Подготовительные и управляющие операции разделяются на следующие классы:

- акты настройки. Каждый такой акт применяется перед осуществлением той или иной операции и не зависит от операндов;
- настройка после ввода. Соответствующие действия применяются после того, как в области ввода аргументов внесены исходные данные. Они могут осуществляться одновременно с применением основных обрабатывающих правил $P1, P2$;
- предписывающие и ограничивающие правила. Последние либо предписывают строгий порядок выполнения $P1, P2$ с целью получить необходимый результат, либо каким-то образом ограничивают свободу их применения.

Действия этих правил для каждой конкретной операции будут пояснены дополнительно.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ БОРТОВОГО СПЕЦПРОЦЕССОРА

Коснемся вначале проблемы реализации простых операций, процент которых при вычислениях в космических условиях весьма высок.

К простым операциям мы относим побитовые операции над словами логического характера, а также сложение и вычитание. Объясним работу автомата на примере логического отрицания.

а) Подготовительное действие — во все ячейки бесконечного влево слова $([-\infty : 1], 2)$ засылаются единицы:

$$(\dots 1 \dots 1) \rightarrow ([-\infty : 1], 2).$$

б) Единственный операнд вводится в область $([-\infty : 2], 1)$.

в) Правила $P1, P2$ применяются в произвольном порядке, но только на линии $([-\infty : 1], 2)$, для $P1$ на этой линии должна находиться единица, для $P2$ — средняя единица.

г) Область вывода результата — $([-\infty : 2], 1)$. Приведенный на рис. 2 пример иллюстрирует работу автомата на слове $(1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1)$.

Выполнение других простых операций представим таблицей. В ней атрибут ARG указывает на области занесения исходных данных. Атрибут RESULT указывает на местоположение результата операции. Атрибут «Правила» указывает на раз-

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	→	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	1	0		1	1	1	0	1	1	0	1	0	0

Рис. 2. Пример реализации операции инвертирования строки

Операция	ARG1	ARG2	RESULT	Правила
$(A1) \text{ and } (A2)$	$([-\infty : 1], 2)$	$([-\infty : 2], 1)$	$([-\infty : 1], 3)$	$\{P2\}$
$(A1) \text{ or } (A2)$	$([-\infty : 1], 2)$	$([-\infty : 2], 1)$	$([-\infty : 2], 1)$	$\{P1\}$
$\text{not}(A2)$	$([-\infty : 1], 2)$	$(1, \dots 1) \rightarrow$ $([-\infty : 2], 1)$	$([-\infty : 2], 1)$	$\{P2\}$
$A1 + A2$	$([-\infty : 1], 2)$	$([-\infty : 2], 1)$	$([-\infty : 2], 1)$	$\{P1, P2\}$
Сдвиг вверх ARGUM 1	$([-\infty : 1], 2)$	$(1, \dots 1) \rightarrow$ $([-\infty : 2], 1)$	$([-\infty : 1], 3)$	$\{P2\}$
Сдвиг вверх и вправо ARGUM 1	$([-\infty : 2], 1)$	$(1, \dots 1) \rightarrow$ $([-\infty : 1], 2)$	$([-\infty : 1], 2)$	$\{P1\}$

решенные во время выполнения операции асинхронные правила. Операция считается законченной, если разрешенные правила не применимы. Запись $\{P1, P2\}$ означает асинхронное применение указанных правил до остановки автомата.

Изменение знака (перевод числа в дополнительный код) требует следующих действий:

$$\begin{aligned} &(\text{ARG1}) \rightarrow ([-\infty : 1], 2); \\ &(1, \dots 1) \rightarrow ([-\infty : 2], 1); \{P2\}; \\ &(0, \dots 0, 0, \dots 0) \rightarrow ([-\infty : 1], [-2 : 3]); \\ &1 \rightarrow (1, 2); \{P1, P2\}; \\ &([- \infty : 2], 1) \rightarrow \text{RESULT}. \end{aligned}$$

Вычитание выполняется аналогично сложению, за исключением того, что вычитаемое представляется в дополнительном коде:

$$\begin{aligned} &(-\text{ARG1}) \rightarrow ([-\infty : 2], 1); \\ &(\text{ARG2}) \rightarrow ([-\infty : 1], 2); \{P1, P2\}; \\ &([- \infty : 2], 1) \rightarrow \text{RESULT}. \end{aligned}$$

Умножение требует такой операции, как взятие декартова произведения D двоичных данных, расположенных на осях:

$$\begin{aligned} &(\text{ARG1}) \rightarrow (0, [1 : \infty]); \\ &(\text{ARG2}) \rightarrow ([-\infty : 1], 0); \\ &\{D(([-\infty : 1], 0), (0, [1 : \infty])); P1, P2\}; \\ &([- \infty : 1], 1) \rightarrow \text{RESULT}. \end{aligned}$$

Деление требует асинхронного применения операции условного декартова произведения Dc с продвижением единиц в левый квадрант, и преобразований $\{P1, P2\}$ до полной остановки процесса:

$$\begin{aligned} &(\text{ARG1}) \rightarrow (0, [1 : \infty]); \\ &(-\text{ARG2}) \rightarrow ([1 : \infty], 0); \\ &\{Dc((x, 0), (0, y), (x, y) = 0, x = [1 : \infty]), P1, P2\}; \\ &([- \infty : 1], 1) \rightarrow \text{RESULT}. \end{aligned}$$

В приведенном примере деление реализуется методом разложения делимого на элементарные слагаемые, например: $1101 = 1000 + 100 + 1$. Это единственная операция, которая нарушает четырехкратное дублирование всех процессов.

Процесс деления может быть остановлен при достижении необходимой точности или при превышении такта реального времени. Результат деления состоит из целой части, дробной и остаточной информации, характеризующей остановку процесса деления на каком-либо шаге.

В зависимости от вида выражения, которое следует вычислить, необходимо размещать на двумерном клеточном пространстве автомата области рабочих регистров и входных аргументов, а также область результатов вычислений. Для реализации разветвляющихся и циклических процессов необходимо использовать специальные управляющие шаблоны данных, которые активизируются при каждой операции освобождения поля автомата.

Технология «мелкозернистых» вычислений, которую нужно шире внедрять в бортовых спецпроцессорах, позволяет быстро и надежно обрабатывать информационные потоки данных, приходящие от различных датчиков состояния корабля, а также вести мониторинг на различных уровнях иерархии.

ОБОСНОВАНИЕ КОРРЕКТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ БОРТОВЫМ СПЕЦПРОЦЕССОРОМ

Поскольку клеточные автоматы одновременно играют роль памяти и процессора, то при расширении системы управления и введении ее новых звеньев не потребуется вносить изменения в уже существующую систему обработки информации. Ее необходимо будет обычным для клеточных автоматов образом «нарастить» из таких же блоков, привязав соответствующие шаблоны ввода-вывода к существующим данным.

В данном разделе остановимся на одном важном результате, который служит предпосылкой корректности выполнения сложных операций. Как обычно, автомат называется однозначным, если любой путь применения правил (см. рис. 1) из одного и того же состояния приводит к одному и тому же заключительному состоянию.

Если S — некоторое состояние автомата, то через $|S|$ обозначим число единиц в нем. Слово $(-\infty : 0], 0)$ в этом разделе назовем регистром. Будем считать, что начиная с него правила $P1, P2$ неприменимы. Заключительное состояние, как обычно, это то состояние, в котором правила при заданных ограничениях на выполнение неприменимы. Довольно просто показать, что для любого конечного состояния любой процесс применения правил, представленных на рис. 1, оканчивается, при этом для любого промежуточного и заключительного состояния S' выполняется $|S'| \leq |S|$.

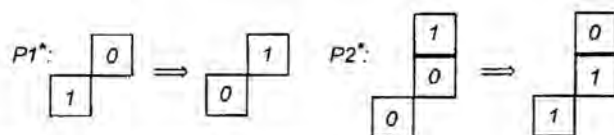


Рис. 3. Система обратных правил для $P1, P2$

Если P — некоторое правило, то P^* обозначает инверсное к нему правило, в котором левая и правая части меняются (рис. 3).

Пусть задан автомат с системой правил (см. рис. 1) и некоторое конечное состояние S . Пусть $N = \{0, 1, \dots, n, \dots\}$ — натуральный ряд, расширенный нулем. Характеристической функцией состояния S , обозначаемой $f(S, i)$ называется натуральное число, выражающее количество единиц на диагонали, идущей от точки на горизонтальной оси с координатой i вправо-вверх до вертикальной оси. Состояния $S1$ и $S2$ назовем сильно эквивалентными, если их характеристические функции одинаковы: $\forall i (f(S1, i) = f(S2, i))$. В дальнейшем эту запись будем обозначать как $f(S1) = f(S2)$. Ясно, что состояния $S1$ и $S2$ сильно эквивалентны, если они получаются одно из другого применением правил $P1, P1^*$.

Пусть $f: i \rightarrow N$ — произвольная целочисленная функция. Будем говорить, что функция $f': i \rightarrow N$ получается из f применением акта элементарной редукции или, сокращенно, e -редукцией (обозначение $f' = r(f)$), если f' отличается от f лишь в двух значениях: i и $i+1$, где $f(i+1) \geq 2$ и $f'(i) = f(i) + 1$, $f'(i+1) = f(i+1) - 2$.

Неформально говоря, акт e -редукции сдвигает две единицы значения f в произвольной точке i на шаг влево, превращая их в одну единицу. Ясно, что математическое определение редукции отражает правило $P2$.

Функция f' называется передукцируемой, если к ней неприменим акт e -редукции, что возможно только в том случае, когда для любого аргумента i значение f' не превышает 1. Функция f редукцируема к функции f' , если существует цепочка элементарных редукций $r_1, r_2, \dots, r_m$, такая, что $f' = r_m(r_{m-1}(\dots r_1(f) \dots))$. Обозначим этот факт $f' = R(f)$.

Довольно просто показать, что если $R1$ и $R2$ — две цепочки элементарных редукций, приводящие f к передукцируемым функциям, то $R1(f) = R2(f)$. Иначе говоря, каким бы путем ни проходило редукцирование функции, результат будет один и тот же.

Кроме того, если $S1$ — некоторое состояние и $S2$ получается из $S1$ путем однократного применения

правила $P2$, то $f(S2) = r(f(S1))$. А если для некоторых состояний $S1$ и $S2$ имеет место $f(S2) = r(f(S1))$, то $S2$ может быть получено из $S1$ путем применения правил $P1$, $P1^*$ и однократного применения правила $P2$.

Очевидно, что используя систему на рис. 1 конечный результат вычислений автомата можно разместить в одной строке, поскольку передупируемая функция $f(i)$ может принимать значения только 0 или 1.

Из приведенного выше видно, что любой процесс применения правил $P1$, $P2$, начинающийся в состоянии S , приводит в заключительное состояние. Применение правила $P1$ не изменяет характеристическую функцию, а применение $P2$ сопровождается актом ее e -редукции. Любой процесс обрывается в состоянии S' , для которого $f(S')$, фактически совпадающая с S' , — передупируема. Наконец, любой путь редуцирования характеристической функции состояния автомата приводит к единственной передупируемой функции. Все сказанное позволяет сделать заключение о корректности использования правил (см. рис. 1), т. е. рассматриваемый автомат является однозначным.

ВЫЧИСЛЕНИЯ НА АВТОМАТАХ С ДЕФЕКТАМИ И ОТКАЗАМИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Возвращаясь к вопросу о надежности вычислений в условиях космической среды и возможности отказа некоторых ячеек, упомянем о модели клеточного автомата с дефектами. В целях применения в космосе нами разработан формализм для организации вычислений в условиях, когда некоторые ячейки рабочего пространства автомата не могут правильно выполнять своих функций. В предлагаемой модели их необходимо отмечать специальным символом, запрещающим выполнение какого-либо локального правила, а также ввод-вывод или сохранение данных. При этом в систему локальных правил (см. рис. 1) добавилось еще одно, позволяющее единицам «перепрыгивать» через соседние ячейки, в том числе и дефектные, что позволяет быстрее получить результат и одновременно решить проблему одиночных дефектов рабочего пространства автомата.

Для представления чисел в модели с дефектами использован двоичный негабинарный код с весами разрядов $(-2)^n$. Перед началом вычислений необходимо зафиксировать координату нулевого разряда. Если i — вертикальная координата, j — горизонтальная, и (i_0, j_0) — координата нулевого разряда, то единица в ячейке (i, j) означает число

$(-2)^{(i-i_0)+(j-j_0)}$. Таким образом, можно вводить числа на клеточную плоскость либо по вертикали, либо по горизонтали, придерживаясь указанной разрядной сетки. Пример такой записи: $1.5 = (110.1) = 4 + (-2) + (-0.5)$.

В том случае, если один из битов вводимого числа попадает на дефектную ячейку, то ввод нуля никак не отражается на изменении состояния автомата, а вводимую единицу необходимо перенести в первую свободную по диагонали от дефекта ячейку.

Выполнение локальных правил перемещения единиц можно совмещать с вводом данных в поле автомата. При этом в строке, к которой «движутся единицы» будет накапливаться результат операции. Очевидно, что при данной системе кодирования правила не зависят от знака чисел.

Организация взаимодействия вертикальных и горизонтальных регистров в условиях наличия дефектов потребовала дополнительной операции, которая при отсутствии возможности ввода данных в ячейку (дефект либо наложение) может осуществлять ввод единицы в соседнюю по диагонали ячейку. При наличии дефектных ячеек в области регистров средствами введенной модели удастся перенести отдельные регистровые ячейки на соседние по диагонали, не изменяя «формы» вычисляемого выражения. Расширенная система правил не избыточна и однозначна, т. е. обеспечивает получение одного и того же результата независимо от последовательности применения этих правил.

ВЫЧИСЛЕНИЯ НАД КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ

Для «адаптации» концепции клеточного вычисления к комплексным числам, не вводя новых значений, кроме $\{0, 1\}$, необходимо выяснить, что представляет собой «информационная единица». Ответ на этот вопрос может дать система кодирования. Нами была использована упомянутая выше негабинарная система кодирования, которая позволила компактно представить комплексные числа и создать универсальную законсервированную систему правил локальных преобразований, реализующих вычисления в комплексном поле. Таким образом, та же самая техника, которая была разработана для преобразований действительных чисел, вполне применима для реализации арифметических операций над полем комплексных чисел. Причем речь идет не об «искусственном» декартовом произведении действительной и мнимой составляющих, а определенном механизме их «упаковки» и «распаковки». Опишем это более детально.

Если каждой ячейке с координатами (i, j) придать вес $(-2)^{(i+j)/2}$, то если сумма координат ячейки (x, y) четна, то ячейка имеет действительный вес, если нечетна — то мнимый. Если сумма координат делится на 4, то вес ячейки положителен, если нет — то отрицателен.

Если обозначить $c = \sqrt{-2}$, то любое комплексное число, независимо от знака действительной и мнимой части можно однозначно представить двоичным кодом с фиксированной точкой в следующей разрядной сетке:

$$\{ \dots, 4, -2c, -2, c, 1, -0.5c, -0.5, 0.25c, \dots \}.$$

Интересным оказалось то, что как и в предыдущем случае, для комплексных чисел существует система асинхронных знаковезависимых правил для клеточного параллельного вычисления арифметических выражений. Основные из них приведены на рис. 4.

Получена также обобщенная система правил локальных преобразований клеточного автомата для универсальных негалинских систем $(-2)^{n/r}$. Это служит предпосылкой компактного представления любых составных значений, что особенно важно в условиях космоса. Однако длительность процесса деления чисел, при отсутствии приоритетов применения правил, на порядок превышает длительность процесса умножения. Эта разница увеличивается с увеличением r .

ВЫВОДЫ

Анализируя все сказанное, можно заключить, что клеточные автоматы являются удобным средством для организации надежных параллельных вычислений в условиях космоса. Кроме того, они просты в технической реализации и на их основе можно создавать программируемые структуры для выполнения трудоемких расчетов в режиме реального времени. Бортовые системы управления космическими аппаратами, создаваемые на их основе, можно легко структурно и программно наращивать. Эти системы могут быть легко программно перестраиваемыми и простыми в эксплуатации. В них можно быстро найти и устранить неисправность, что немаловажно в экстремальных условиях.

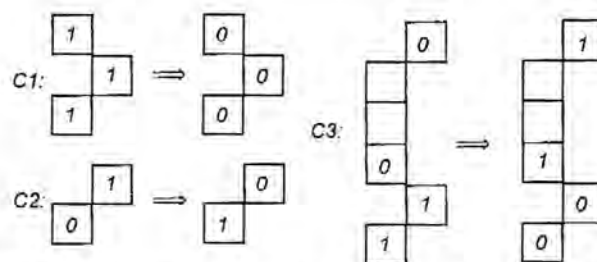


Рис. 4. Система вычислительных правил для комплексных чисел

И наконец, специпроцессоры, созданные на базе клеточных автоматов, сохраняют свою работоспособность при некоторых дефектах рабочего поля и минимальной избыточности, что также немаловажно в условиях космического окружения. Все предложенные в работе методы тщательно проверены на разработанной нами системе моделирования клеточных автоматов.

1. Ачасова С. М., Бандман О. Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. — Новосибирск: Наука, 1990. — 252 с.
2. Вальковский В. А., Зербино Д. Д. Реализация арифметических вычислений в знакопеременных кодах на клеточных автоматах // Пробл. упр. и автоматизации. — 1997. — № 2. — С. 49–64.
3. Codd E. F. Cellular Automata: — New York: Acad. Press, 1968. — 198 p.

ON THE USE OF CELLULAR AUTOMATA AS SPACE-BORNE CALCULATION SYSTEMS

V. A. Val'kovskii and D. D. Zerbino

The possibility of using cellular automata of special structure in the space-borne systems of information processing and control is discussed. Such automata are distinctive in that they have a regular structure, are highly reliable, provide the interchangeability of their modules, extensibility, massive parallelism of information processing, and high productivity. Their high reliability allows them to operate in the case of failure of some cells. Some examples of arithmetic cellular automata designed for the realization of algorithms on complex numbers are given. We discuss the independence of computation results from the order of application of automation rules.

УДК 681.518.3(075.8)

Метод надійнісного моделювання самовідновлюваних бортових інформаційних систем

Б. А. Мандзій, В. П. Беляєв, Б. Ю. Волочій

Державний університет «Львівська політехніка», Львів

Надійшла до редакції 30.03.98

Запропоновано метод аналізу стохастичних систем напівмарковського типу, який дозволяє зменшити розмірність математичних моделей аналізованих систем при збереженні достатньої для задач системотехнічного проектування точності. Метод також є зручним з точки зору формалізації побудови моделі і подальшої автоматизації розрахунків.

ВСТУП

Підвищення складності і відповідальності функцій, які виконують сучасні космічні апарати, ставить вимогу до самовідновлюваності неослужовуваних бортових інформаційних систем в число основних. Для досягнення цієї мети бортовим інформаційним системам (БІС) необхідно надати властивість відмовостійкості, яка забезпечується введенням різних видів надлишковості [3]. Для вибору оптимальної структури БІС, оптимальних виду та способу введення надлишкового ресурсу проєктант повинен вирішувати складну задачу багатопараметричної оптимізації. Розв'язок такої задачі вимагає в першу чергу побудови математичної моделі БІС, яка б адекватно відображала її структуру і алгоритм поведінки при виникненні порушення працездатності. Такі моделі відносяться до класу дискретно-неперервних випадкових процесів, зокрема марковських і напівмарковських. Велика розмірність моделей вимагає значних часових затрат при їх побудові, тому актуальною є задача формалізації і автоматизації цього процесу. Запропонований авторами метод розв'язку такої задачі для випадку марковських процесів викладено в роботі [2].

Значна трудоемкість побудови моделей стохастичних систем напівмарковського типу, а також висока обчислювальна складність їх аналізу в багатьох випадках є причиною швидше вимушених, аніж обґрунтованих спрощень. Відомі методи забезпечення адекватності моделі: метод стадій (фаз Ерланга) і метод вкладених ланцюгів Маркова мають ряд обмежень, які суттєво зменшують можливість їх використання в системотехнічних САПР. Метод стадій передбачає побудову і аналіз марковських моделей процесів із значно розширеним фазовим простором, що обумовлює необхідність рішення систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь високих порядків. Метод вкладених ланцюгів Маркова зорієнтований на аналіз стаціонарного режиму, а значить, не дає можливості отримати весь комплекс необхідних показників (наприклад, в деяких задачах надійнісного проектування необхідно аналізувати системи, в яких стаціонарний режим відсутній).

В даній статті викладено метод аналізу БІС, які належать до класу стохастичних систем напівмарковського типу і є базою для побудови автоматизованої процедури аналізу систем даного класу.

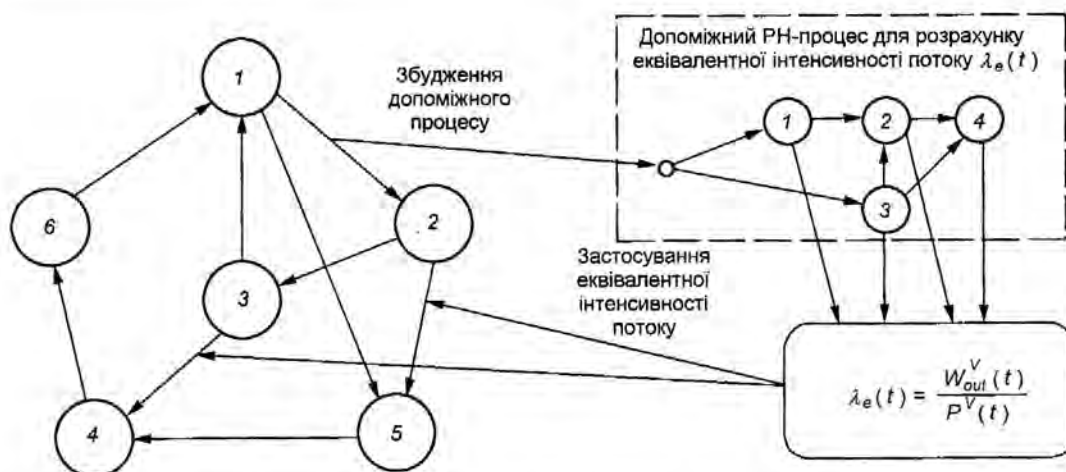


Рис. 1. Узагальнена схема побудови моделі стохастичної системи за методом еквівалентної інтенсивності потоку

СУТЬ МЕТОДУ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ПОТОКУ

Типовою задачею, яка вимагає застосування апарату теорії напівмарковських дискретно-неперервних випадкових процесів, є задача аналізу систем, в яких в деякий випадковий момент часу t_s відбувається зміна стану системи. Ця зміна стану ініціює початок деякого процесу A , тривалість якого τ_a має відомий неекспоненціальний розподіл, який не залежить від t_s . Позначимо функцію розподілу тривалості τ_a як $F_a(\tau_a)$, а густину розподілу як $f_a(\tau_a)$. Відповідно інтенсивність потоку подій завершення протікання процесу A визначатиметься за формулою

$$\lambda_a(\tau_a) = \frac{f_a(\tau_a)}{1 - F_a(\tau_a)}. \quad (1)$$

При проведенні аналізу системи нас цікавить не тривалість процесу, а його стан (розпочався, протікає, завершився) в задані моменти часу, які відраховуються від моменту початку функціонування системи. Випадковий момент часу t_e завершення процесу A є сумою двох незалежних випадкових складових:

$$t_e = t_s + \tau_a.$$

Відповідно, функція розподілу випадкової величини t_e дорівнює:

$$F_e(t_e) = \int_0^{t_e} F_a(t_e - t_s) dF_s(t_s), \quad (2)$$

де $F_s(t_s)$ — функція розподілу випадкової величини t_s .

Використовуючи формулу (2), можна визначити густину розподілу $f_e(t_e)$ випадкової величини t_e та інтенсивність $\lambda_e(t_e)$:

$$f_e(t_e) = \frac{dF_e(t_e)}{dt_e}, \quad \lambda_e(t_e) = \frac{f_e(t_e)}{1 - F_e(t_e)}. \quad (3)$$

Суть запропонованого методу полягає в апроксимації заданого процесу напівмарковського типу неоднорідним марковським процесом. При цьому параметр $\lambda_e(t_e)$ отримує зміст еквівалентної інтенсивності переходів, які відповідають завершенню процесу A .

В описаному варіанті методу моделювання математичною моделлю БІС є система інтегро-диференціальних рівнянь, в якій операція інтегрування використовується тільки для визначення еквівалентних інтенсивностей. Задача аналізу БІС може бути зведена до розв'язку системи однорідних диференціальних рівнянь, якщо для визначення еквівалентних інтенсивностей використовувати допоміжні процеси. Ці процеси апроксимують розподіл тривалості протікання реальних процесів розподілом фазового типу (РН-розподілом) [1]. Такий підхід дозволяє розв'язувати задачу формалізації і автоматизації побудови математичної моделі систем даного класу з використанням принципів рішення аналогічної задачі для систем марковського типу [2].

Таким чином, згідно з запропонованим методом математична модель БІС формується як сукупність неоднорідного марковського процесу, який описує поведінку БІС в цілому і допоміжних марковських процесів, призначених для розрахунку інтенсивностей переходів неоднорідного марковського процесу.

На рис. 1 зображено граф станів моделі. Процеси з неекспоненціальним розподілом збуджуються при переході системи із стану 1 в стан 2. Щільність цього потоку використовується для збудження допоміжного процесу фазового типу. Значення знайденої еквівалентної інтенсивності використовується як інтенсивність переходів, які відповідають завершенню даного процесу (із стану 2 в стан 5, із стану 3 в стан 4).

ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ДЛЯ АНАЛІЗУ САМОВІДНОВЛЮВАНОЇ СИСТЕМИ

Самовідновлювана система будується за мажоритарною відмовостійкою структурою з правилом вибору «2 з 3». Задається необхідність врахування ефекту старіння апаратних модулів за розрахунковий час експлуатації. При відмові двох модулів здійснюється реконфігурація системи: схема контролю (за показниками наближається до ідеальної) миттєво відключає схему мажорювання, визначає працездатний модуль і покладає на нього виконання функцій системи. При наявності двох несправних модулів комплекс відновлення працездатності (КВП) здійснює їх заміну по чергові. Заміна несправного модуля проводиться відразу після його відмови, якщо КВП знаходиться в стані очікування, або одразу після закінчення процедур заміни попереднього модуля. КВП може здійснити не більше двох відновлень. Вважається, що відновлення є повним, тобто старіння відновленого модуля починається з початкового стану. Закон розподілу для інтегралів часу безвідмовної роботи всіх модулів однаковий і задається РН-розподілом. Закон розподілу для тривалостей відновлення також представлений РН-розподілом.

З метою спрощення викладу без обмеження рівня загальності можна прийняти, що РН-розподіли тривалості безвідмовної роботи модулів і тривалості їх відновлення представлені тринпараметричними розподілами Ерланга, графі станів і переходів для яких зображені на рис. 2.

Побудований за викладеною методикою граф станів і переходів описаної вище системи представлено на рис. 3. Стан 1 — початковий стан системи. При виході з ладу одного з модулів робочої конфігурації здійснюється перехід в стан 2. Інтенсивність переходу складає $3\lambda(t)$, причому з метою забезпечення ідентичності підходу розрахунок значень $\lambda(t)$ може здійснюватися шляхом інтегрування допоміжного процесу фазового типу (рис. 3, б, стани 21, 22, 23), тобто аналогічно до розрахунку еквівалентних інтенсивностей:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_{F3} P_{23}(t)}{P_{21}(t) + P_{22}(t) + P_{23}(t)}, \quad (4)$$

де $P_i(t)$ — ймовірності перебування допоміжного РН-процесу у відповідних станах, $i = 21, 22, 23$.

З переходом системи в стан 2 негайно починається відновлення модуля, який вийшов з ладу. Оскільки тривалість процесу відновлення розподілена не за експоненціальним законом, то для пошуку значень еквівалентної інтенсивності завершення відновлення $\mu_1(t)$ використовується допоміжний процес фазового типу (рис. 3, б, стани 24, 25, 26):

$$\mu_1(t) = \frac{\mu_{E3} P_{26}(t)}{P_{24}(t) + P_{25}(t) + P_{26}(t)}. \quad (5)$$

Збуджується даний процес зовнішнім потоком, щільність якого дорівнює щільності потоку переходів із стану 1 в стан 2: $3\lambda(t) \cdot P_1(t)$.

Система покидає стан 2 після завершення відновлення модуля (перехід з 2 в 3 з інтенсивністю $\mu_1(t)$) або при відмові одного з двох модулів, які залишилися в працездатному стані (перехід з 2 в 1 з інтенсивністю $2\lambda(t)$). Для визначення еквівалентної інтенсивності відмови відновленого модуля $\lambda_1(t)$ скористаємося допоміжним РН-процесом, представленим станами 27, 28, 29 (рис. 3, б).

Оскільки включений в робочу конфігурацію резервний модуль негайно і безумовно вводиться в експлуатацію, даний РН-процес збуджується безпосередньо потоком подій, які відповідають моментам завершення відновлення, щільність якого рівна $\mu_{E3} P_{26}(t)$. Вираз для $\lambda_1(t)$ формується аналогічно виразам (4), (5):

$$\lambda_1(t) = \frac{\lambda_{F3} P_{29}(t)}{P_{27}(t) + P_{28}(t) + P_{29}(t)}. \quad (6)$$

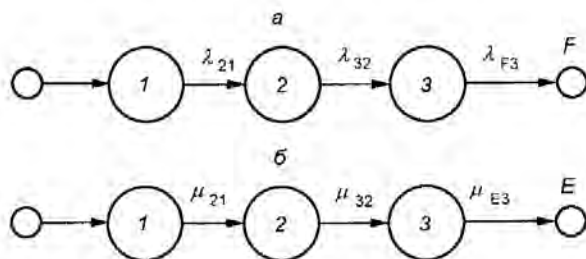


Рис. 2. Графи станів і переходів РН-процесів, які моделюють розподіли тривалості безвідмовної роботи (а) та відновлення (б)

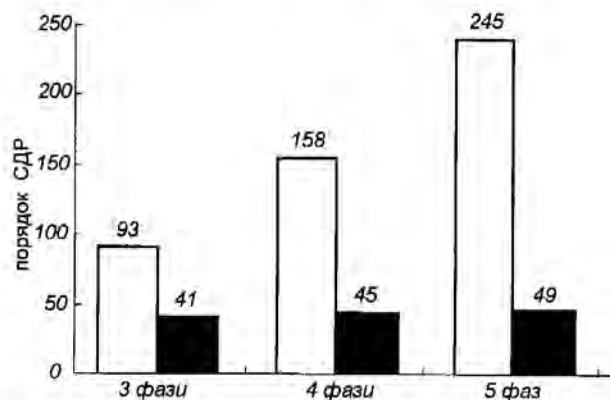


Рис. 4. Діаграма залежності порядку СДР від порядку РН-розподілу тривалості безвідмовної роботи модулів: чорні стовпчики — метод еквівалентної інтенсивності потоку, білі — метод стадій

Оскільки порядок визначення всіх еквівалентних інтенсивностей аналогічний розглянутому, при подальшому розгляді будемо вказувати тільки опис стадій, еквівалентні інтенсивності і відповідні допоміжні РН-процеси.

Перехід із стану 3 в стан 4 здійснюється при виході з ладу модуля, який був встановлений після першої відмови. Оскільки стан 3 передбачає перебування КВП в стані очікування, негайно розпочинаються процедури другого відновлення працездатності системи. Для розрахунку еквівалентних інтенсивностей завершення процесу відновлення $\mu_1^1(t)$ і інтенсивності відмов відновленого модуля $\lambda_2^1(t)$, використовуються РН-процеси, задані на множинах станів 30, 31, 32 і 33, 34, 35 відповідно. Ці допоміжні процеси збуджуються зовнішнім потоком подій з щільністю $\lambda_1(t)P_3(t)$. Нарешті, з моменту переходу системи в стан 12 в ній знову починається процес відновлення чергового несправного модуля. Перехід системи в стан 12 можливий або із стану 3 при відмові одного з двох модулів робочої конфігурації (інтенсивність переходу $2\lambda(t)$), або із стану 11 після завершення процедур по заміні модуля, який відмовив вперше (інтенсивність переходу — еквівалентна інтенсивність $\mu_1(t)$). Для розрахунку еквівалентних інтенсивностей завершення процедур відновлення $\mu_2^2(t)$ і інтенсивності відмов встановленого модуля $\lambda_2^2(t)$, використовуються РН-процеси, задані на множинах станів 36, 37, 38 і 39, 40, 41 відповідно (рис. 3, б). Зовнішнє збудження цього ланцюжка станів здійснюється потоком з щільністю $2\lambda(t)P_3(t) + \mu_1(t)P_{11}(t)$.

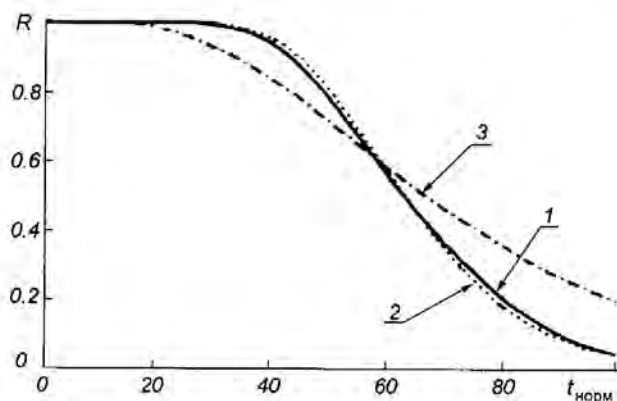


Рис. 5. Результати розрахунку імовірності безвідмовної роботи відмовостійкої самовідновлювальної системи різними методами: 1 — метод стадій; 2 — запропонований метод; 3 — поширений метод, який передбачає експоненційну апроксимацію процесів з неекспоненційно розподіленою тривалістю

Подальша побудова моделі реалізується за відомими правилами побудови марковської моделі неоднорідного випадкового процесу з використанням визначених вище еквівалентних інтенсивностей як інтенсивностей переходів.

Визначення розподілу ймовірностей перебування в станах здійснюється шляхом чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь Колмогорова — Чепмена, сформованих за графом станів неоднорідного марковського процесу і допоміжних РН-процесів, з обчисленням на кожній ітерації еквівалентних інтенсивностей. Слід звернути увагу на те, що запропонований метод вимагає подання в нетрадиційному вигляді (для задач надійнісного аналізу) початкових умов. В розглянутому прикладі ці умови є такими:

$$P_1(0) = P_{21}(0) = 1, P_i(0) = 0 \text{ для всіх } i \notin \{1, 21\}.$$

При інтерпретації результатів аналізу використовуються імовірності перебування в станах неоднорідного марковського процесу (стани 1–20).

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ

Оцінка базується на порівнянні порядків систем диференціальних рівнянь, які формуються при розв'язку тестової задачі запропонованим методом та іншими відомими методами. Для тестової задачі прийнята розглянута вище відмовостійка система, для якої сформовано математичні моделі, які відрізняються порядком РН-розподілу тривалості безвідмовної роботи модулів. Еталонами служать марковські моделі, сформовані із застосуванням методу стадій і програмних засобів їх автоматизованої

побудови [2] при аналогічних видах законів розподілу тривалостей безвідмовної роботи і відновлення.

На рис. 4 показано залежність порядків систем диференціальних рівнянь від кількості фаз при формуванні марковської моделі запропонованим методом і методом стадій. Із збільшенням кількості фаз порядок системи диференціальних рівнянь в першому випадку збільшується п'ятьма, в той же час у другому випадку він зростає майже в три рази.

На рис. 5 показано результати розрахунку ймовірності безвідмовної роботи досліджуваної системи трьома різними методами при кількості фаз, рівній 3.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що запропонований метод забезпечує необхідну для розв'язку практичних задач системотехнічного проектування точність оцінки показників надійності при прийнятних обчислювальних затратах.

ВИСНОВОК

Описаний метод дозволяє відносно просто формалізувати процес побудови математичних моделей відмовостійких БІС і забезпечує необхідну точність

оцінок показників при зменшеній розмірності моделей. Це дозволяє ефективно реалізувати процедури синтезу відказостійких БІС через багатоваріантний аналіз або в інтерактивному режимі проектування.

1. Башарин Г. П., Бочаров П. П., Коган Я. А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. — М.: Наука, 1989. — 336 с.
2. Беляев В. П., Волочий Б. Ю., Мандзий Б. А. Автоматизация построения надежных моделей отказоустойчивых РЭС // Техника, экономика. Сер. Автоматизация проектирования. — 1994. — Вып. 2-3. — С. 73–81.
3. Волочий Б. Ю., Калашников И. Д., Мазепа Р. Б., Мандзий Б. А. Проектирование отказоустойчивых микропроцессорных информационно-измерительных систем. — Львов: Вища школа, 1987. — 152 с.

METHOD FOR THE RELIABILITY MODELING OF SELFREPAIRING ONBOARD INFORMATION SYSTEMS

B. A. Mandziy, V. P. Belyaev, and B. Yu. Volotchiy

A method is proposed for the analysis of stochastic semi-Markov systems. The method allows the reduction of the dimension of mathematical models of analyzed systems, with accuracy an sufficient for the problems of technical system design being retained. The method is convenient from the standpoint of formalization of model construction and subsequent automatization of calculations.

УДК 681.142

Нарощувані системи збору інформації та їх застосування на борту пілотованих космічних станцій

І. І. Кравець, Ю. В. Опомяк

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Розглядаються питання, пов'язані із створенням бортової відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації, яка допускати масштабованість та нарощуваність. Така система дасть можливість інформаційно охопити визначені вузли та системи пілотованої космічної станції (ПКС), інформаційно забезпечувати наукові експерименти, що проводитимуться на борту ПКС, оперативно інформаційно реагувати на можливі екстремальні та аварійні ситуації на борту ПКС, проводити комплексний аналіз умов виникнення цих ситуацій.

ВСТУП

При створенні та функціонуванні складних розширюваних космічних комплексів здійснюється постійний контроль спеціалізованими інформаційно-вимірювальними засобами різноманітних параметрів конструкцій, вузлів, систем енерго-, ресурсо-забезпечення та підтримання умов життєдіяльності. При проведенні комплексних довготривалих експериментів також використовуються спеціалізовані засоби контролю за умовами їх проведення, збереження та обробки одержаних даних. З огляду на складність завдань та зміну умов роботи при розширенні космічного комплексу необхідно мати можливість розгортання інформаційно-вимірювальних засобів контролю загального призначення, їх коректної інтеграції з вимірювальними вузлами спеціалізованих систем та ефективною адаптації до особливостей використання на даний час. Актуальність створення бортових інформаційних систем, що призначені для інформаційного забезпечення потенційних користувачів на борту пілотованих космічних станцій та на Землі є беззаперечною.

Існуючі системи мають ряд обмежень, обумовлених архітектурою та функціональними можливостями, що веде до неможливості їх застосування як бортових інформаційних систем. Це стосується їх мобільності, можливостей ефективного нарощування інформаційної ємності системи та оперативності розгортання, масо-габаритних характеристик.

З іншої сторони, вже існуючі бортові системи інформаційного забезпечення мають суттєві обмеження щодо можливості нарощування кількості вимірюваних параметрів.

Проблема ще більше загострюється за умови необхідності інформаційного забезпечення експериментів, що мають проводитися на борту ПКС. У цьому випадку, як правило, кожним постановником експерименту створюються і засоби його інформаційного забезпечення, що призводить до інформаційної несумісності та неможливості оперативного інформаційного обміну із зацікавленими користувачами.

Таким чином, створення бортової відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інфор-

мації для застосування на ПК є, на думку авторів, особливо актуальним.

Пропонована авторами концепція системи передбачає можливість поетапного впровадження та розгортання. Система може застосовуватись для ведення постійного відбору, обробки та накопичення інформації від різноманітних вузлів і систем ПК, у випадку необхідності — застосовуватись для інформаційного забезпечення різноманітних наукових експериментів, що проводимуться на борту ПК, а у аварійних ситуаціях — оперативно розгортатись протягом декількох годин.

Концепція пропонованої системи передбачає такі переваги:

- універсальність апаратної та програмної частин системи стосовно забезпечення відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації;
- відкритість системи, можливість розгортання системи поетапно, починаючи з мінімально необхідної кількості контрольованих параметрів, в найкоротші терміни та при необхідності — встановлення на діючому обладнанні ПК;
- представлення інформації в реальному часі у зручному для користувача вигляді (інформація, прив'язана до мнемосхем технологічних процесів ПК та експериментів; графіки параметрів);
- підтримка системою бортової локальної мережі передачі даних, що дозволяє отримувати інформацію одночасно широкому колу користувачів і за різноманітною тематикою та у відповідності з правами доступу;
- підхід до створення системи, що полягає в комплексному поєднанні задач відбору, зберігання, обробки та відтворення інформації;
- отримувана системою інформація дозволить виявляти закономірності між вимірюваними параметрами, проводити їх кількісну і якісну оцінку та прогнозувати стан досліджуваних процесів на основі повного математичного забезпечення сучасних баз даних.

БАГАТОРІВНЕВА НАРОЩУВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

На початку 1990-х років в рамках програми «Перспективні інформаційні технології і системи» ДКНТ України була розроблена концепція інформаційної системи для підприємства із складним розосередженим технологічним процесом. Додаткові вимоги висувала необхідність використання існуючих датчикових систем, каналів передачі інформації та неможливість зупинки технологічного процесу.

Крім того, процес інформатизації планувалося виконувати протягом певного часу у декілька етапів. Існуючі на той час системи не відповідали висунутим вимогам. Була створена високоефективна система збору інформації з повним математичним і програмним забезпеченням обробки, збереження та відображення технологічної інформації у тепло-, енерго-, водопостачанні та екологічному моніторингу промислово-насичених регіонів [3–5].

Розроблена система збору інформації (рис. 1) складається з набору автономних комплектів мікропроцесорних контролерів та базової ПЕОМ, об'єднаних лініями зв'язку, системними шинами та програмним забезпеченням у інформаційну мережу. Комплект складається з периферійного контролера, контролера зв'язку та накопичення інформації, контролера зв'язку з ПЕОМ. Система збору інформації має можливість підключення мобільних засобів контролю стану навколишнього середовища. Завдяки малим розмірам та простоті підключення

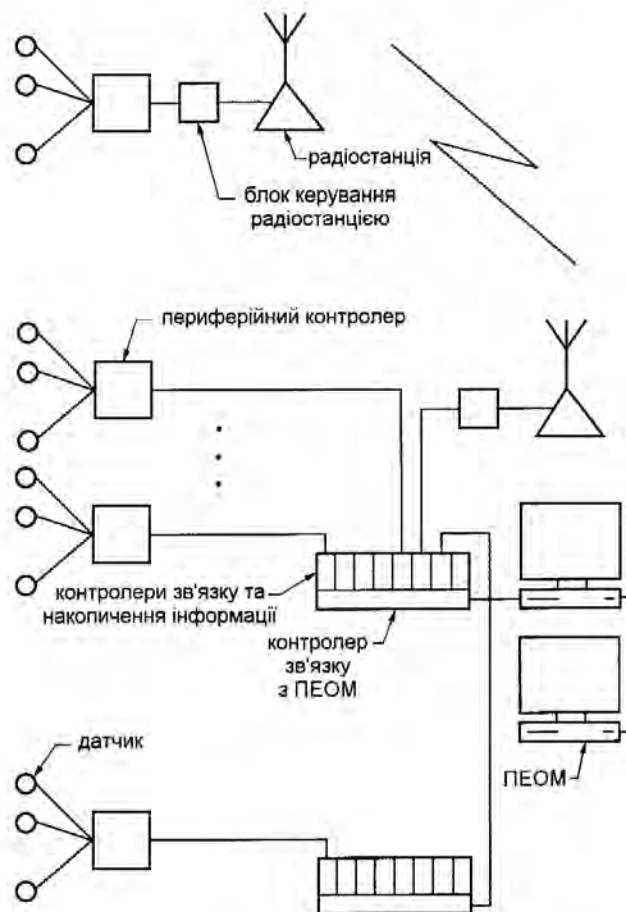


Рис. 1. Структурна схема системи збору та обробки інформації

чення периферійний контролер може встановлюватися в приміщеннях з технологічним обладнанням на певній віддалі від первинних перетворювачів, що дозволяє організувати збір інформації на існуючих технологічних лініях без зупинки технологічного обладнання. Він забезпечує збір інформації з первинних перетворювачів по 32 програмованих входах; первинну обробку інформації; контроль перевищення встановлених допусків; обмін інформацією з контролером накопичення інформації по двопровідній некомутованій лінії зв'язку на віддалі до 20 км; обмін інформацією з контролером накопичення інформації радіоканалом на віддалі, що залежить від типу радіостанції.

Периферійний контролер узгоджений з вихідними сигналами первинних перетворювачів 0–5 мА або «сухий контакт». Може бути апаратно узгоджений із струмовим сигналом 0–20 мА або програмно з рівнем 0–5 В. Тип входу та встановлення допусків здійснюється програмно при конфігуруванні системи.

Контролер зв'язку та накопичення інформації є другою невід'ємною частиною одного каналу збору інформації і зв'язує периферійний контролер з базовою ПЕОМ. ПЕОМ може обслуговувати до 256 контролерів зв'язку та накопичення інформації, що дозволяє створити інформаційну мережу, яка контролює до 8192 технологічних параметрів. Контролер здійснює зв'язок з периферійним контролером; встановлення типу аварійних сигналів; нормалізацію одержаної інформації; пересилання керуючих параметрів з ПЕОМ в периферійний контролер; накопичення інформації; швидкий обмін інформацією з ПЕОМ. Контролер зв'язку та накопичення інформації може працювати цілодобово і накопичувати інформацію в автономному режимі з періодичністю сеансів вводу її в ПЕОМ не менше 12 год.

Контролер зв'язку з ПЕОМ призначений для організації інформаційного обміну між контролерами зв'язку і накопичення інформації та ПЕОМ. В цілому система має такі технічні характеристики:

- розрядність — 16 біт (11 біт — дані, 5 біт — стан);
- розмір посилки — 66 байт;
- швидкість передачі — 3 кБод;
- періодичність обміну (в залежності від режиму) — 2 с — 5 хв;
- час накопичення інформації — не менше 12 год.

Додаткові переваги інформаційної мережі створюють можливість організації зв'язку, через контролери накопичення, між двома або кількома аналогічними мережами, або між інформаційною мережею та централізованим пунктом збору інформації.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє повністю використати всі можливості системи та є максимально зручним для користувача. За його допомогою користувач може самостійно розробити усі необхідні компоненти мнемосхем технологічних процесів (рис. 2, а), що відтворюються на екрані ПЕОМ, конфігурувати систему, встановивши параметри, які описують кожний датчик (одиночку вимірювання, межі, допуски, місце встановлення і т. п.), а вести обробку отриманої інформації та відтворювати її у вигляді різноманітних діаграм та графіків (рис. 2, б). Контроль біжучих даних, аналіз та обробка накопиченої інформації дозволяє вести постійний моніторинг технологічних процесів та прогнозувати стан технологічного обладнання.

При встановленні мережі здійснюється конфігурування системи та можлива розробка додаткового обслуговуючого програмного забезпечення відповідно до умов використання технологічного обладнання.

Таким чином, система збору інформації забезпечує створення локальної мережі збору, накопичення та обробки інформації, можливість розширення її і нарощування в процесі експлуатації, забезпечує гнучку взаємодію диспетчерської служби і технологічних підрозділів, яка реалізується через графічне представлення отриманої інформації у вигляді мнемосхем та графіків.

Система встановлена на технологічному обладнанні насосної станції «Дніпро» (м. Київ), успішно використовується при управлінні водними ресурсами для м. Львова на підприємстві «Львівводоканал», де з її допомогою отримані нові цікаві результати [2], на очисних спорудах концерну «Хлорвіпіл» (м. Калуш).

Ведуться роботи щодо модифікації системи з використанням нових швидкодіючих 16-розрядних мікропроцесорів серії MCS-96 фірми Intel, що дасть можливість суттєво покращити її технічні характеристики.

НАРОЩУВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПІЛОВОАНОЇ КОСМІЧНОЇ СТАНЦІЇ

В основу концепції запропонованої системи покладено нові результати, отримані нами при розробці та впровадженні ряду спеціалізованих та проблемно-орієнтованих систем збору технологічної інформації [1, 6]. Ці системи побудовані з використанням сучасних обчислювальних засобів, нових типів мікропроцесорних пристроїв та засобів створення програмного забезпечення, а також спеціалізованих обробки телеметричної інформації, що були розроблені і впроваджені на ПКС «Мир».

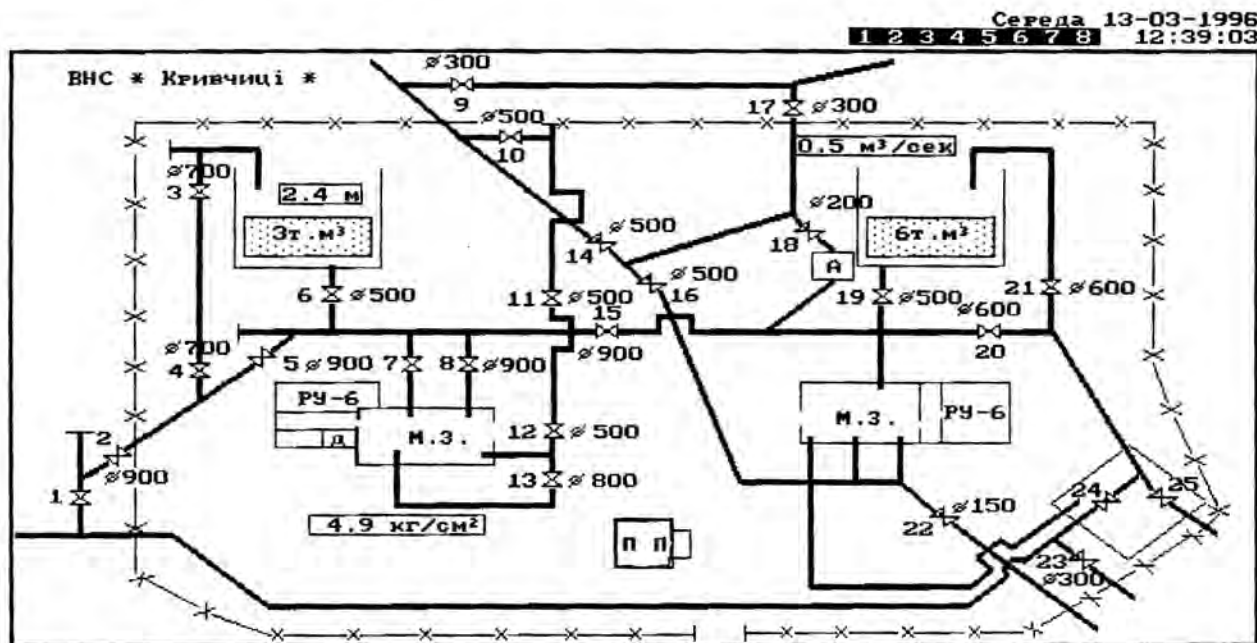


Рис. 2. Приклад робочих вікон програми з мнемосхемою технологічного процесу та відображуваними на ній технологічними параметрами (а) та з графіком технологічного параметра (б)

Значна інформаційна насиченість сучасних ПКС та її очевидне зростання у випадку створення нових ПКС вимагає постійного слідкування за тисячами тисяч параметрів. До цього додається необхідність інформаційного забезпечення сотень, можливо тисяч, різноманітних та різнопрофільних наукових експериментів, що проводитимуться на борту ПКС. Усе це змушує шукати нові підходи до вирішення цієї проблеми.

Найбільш доцільним, на думку авторів, є підхід, який поєднує вирішення запропонованою системою декількох задач. Це, по-перше, ведення постійного інформаційного моніторингу визначених вузлів і систем ПКС, інформація про які могла б становити інтерес для широкого кола потенційних користувачів як на борту ПКС, так і на Землі. Наприклад,

інформація про масу пального у баках ПКС є важливою для проведення різноманітних та різнопрофільних експериментів і могла б бути «інформацією колективного доступу». По-друге, розгортання додаткових інформаційних засобів запропонованої системи у випадку необхідності проведення нових наукових експериментів. Це значно спростило б вирішення питань інформаційної сумісності розроблюваних систем, а у багатьох випадках виключило б необхідність їх розробки взагалі. З іншого боку, інформація та дані про проведені експерименти зразу ж надходила б до користувачів у відповідності до їх прав доступу. По-третє, у випадку виникнення аварійних чи екстремальних ситуацій система надавала б інформаційні ресурси протягом малого проміжку часу (до декількох годин).

Слід зазначити, що концепція запропонованої системи жодним чином не виключає необхідності існування систем та засобів ПКС, що вже функціонують і не призначена для їх заміни. Основна роль системи, на думку авторів, полягає в інформаційному охопленні всіх визначених вузлів та систем ПКС, різноманітних експериментів, що проводяться на її борту з метою забезпечення всіх зацікавлених користувачів «інформацією колективного доступу». Тобто, основними вимогами до системи є її

мобільність, простота встановлення та нарощування, а також велика інформаційна ємність, що характеризується кількістю вимірюваних параметрів, сукупною розосередженою пам'яттю для зберігання даних, обчислювальними ресурсами для їх обробки та числом потенційних користувачів системи.

Використання у пропонованій системі для передачі інформації різноманітних каналів зв'язку забезпечило б легку її інтеграцію в існуючі інформаційні засоби ПКС та дозволило б створити територіально розосереджену бортову багаторівневу мережу відбору, зберігання та відтворення інформації.

Запропонована ідеологія розподіленої багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації забезпечуватиме відкритість системи для подальшого розвитку її можливостей. Система забезпечувала б ефективний відбір, нагромадження та відтворення інформації про стан ПКС та різних експериментів. У подальшому розвитку ця система могла б інформаційно охопити всю ПКС. Отримані масиви інформації про проведені експерименти, стан обладнання та екстремальні ситуації дали б можливість узагальнення та прогнозування подальшого стану ПКС та ефективності проведених наукових експериментів.

Для реалізації запропонованої концепції відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації для ПКС необхідна розробка та створення:

- периферійної мережі пристроїв первинного відбору інформації, зв'язаних каналами передачі даних з пристроями обробки, накопичення та відображення інформації (створення апаратних засобів первинного відбору інформації, засобів накопичення та обробки інформації, пристроїв забезпечення внутрішньосистемного обміну інформацією, апаратних засобів тестування пристроїв системи);
- засобів оперативного розгортання, що використовуються при необхідності проведення наукових експериментів на борту ПКС або при виникненні екстремальних чи аварійних ситуацій;
- пакету системних, обслуговуючих та сервісних програм, що забезпечують функціонування системи (драйвери пристроїв, програми тематичної та проблемно-орієнтованої обробки даних, програми багатоканального динамічного відтворення інформації та ін.).

Розглянемо більш детально питання реалізації системи. Засоби первинного відбору інформації повинні мати можливість підключення різноманітних

датчикових систем, що не входять у структуру системи і забезпечуються постановником експерименту. Бажано було б забезпечити використання переважно стандартизованих датчиків. Це найбільше стосується вихідних параметрів датчиків. Пристрій первинного відбору інформації повинен включати високоякісний вхідний аналоговий комутатор (24–64 входи) та аналого-цифровий перетворювач (12–16 біт), вхідний цифровий комутатор 16–32 біт (8–16 напрямків), вхідний інтерфейс RS-232 (2–4 напрямки). Такий набір інформаційних входів, на нашу думку, інформаційно забезпечив би переважну більшість експериментів та досить легко реалізувався б з використанням сучасних мікропроцесорних пристроїв. Далі пристрій первинного відбору мав би забезпечувати можливість конфігурування інформаційних входів, попередню обробку отриманих даних (усереднення, фільтрацію) та їх накопичення. За допомогою пристроїв міжсистемного обміну інформація надходила б на пристрої накопичення, зберігання та проблемно-орієнтованої її обробки. Як інтерфейс у цьому випадку найбільш доцільно, на нашу думку, використати шину Universal Serial Bus (USB), яка допускає нарощування та динамічне підключення-відключення до 127 USB-сумісних пристроїв та забезпечує швидкість обміну до 12 Мбіт/сек. Для реалізації операцій накопичення чи проблемно-орієнтованої обробки на робочих місцях можливе застосування мобільних Notebook-комп'ютерів, які мають засоби підтримки шини USB та RS-232. Для передачі інформації у межах ПКС найбільш доцільно застосувати засоби ETHERNET з використанням коаксіального кабелю чи витієї пари та концентраторів, а для інформаційного обміну — застосувати протокол TCP-IP та технології Intranet.

ВИСНОВКИ

Пропонована система збору інформації має відкриту архітектуру, яка дозволяє легко нарощувати її інформаційну ємність від сотень вимірюваних параметрів до десятків або сотень тисяч з незначними апаратними затратами та без необхідності змін у програмному забезпеченні. Система дозволяє вести постійний та неперервний моніторинг визначених вузлів та систем ПКС. У випадку необхідності проведення наукових експериментів за короткий проміжок часу програмним шляхом здійснюється конфігурування додаткових інформаційних засобів системи у відповідності з вимогами до конкретного експерименту (параметрами давачів та ін.). Інфор-

мація, отримувана у ході експерименту, може зразу використовуватись зацікавленими користувачами у відповідності до їх прав доступу. При виникненні екстремальних або аварійних ситуацій під'єднання додаткових інформаційних засобів виконується таким самим чином, що відразу дає можливість слідування (відбір, обробка чи відтворення) за процесами, що відбуваються.

На основі узагальнення отриманої інформації можливе прогнозування виникнення екстремальних або аварійних ситуацій, їх імовірних наслідків, визначення умов виникнення та можливих заходів щодо їх усунення. Створення банків даних наукової інформації за проведеними на борту ПКС експериментами дасть можливість їх детального вивчення та оцінки усіма зацікавленими користувачами.

Використання запропонованої архітектури відкритої високоефективної багаторівневої системи відбору, передачі, попередньої обробки та відтворення інформації та її реалізація на борту космічної станції дозволить створити інтегровану інформаційну мережу та виявити нові закономірності та взаємозв'язки параметрів проведених наукових експериментів. Розгортання системи може проводитись поетапно і охонити у випадку необхідності усі визначені вузли та системи ПКС.

1. Батюк А. Є., Опотяк Ю. В. Перепрограмований спецпроцесор для систем автоматичного управління і контролю // Автоматика-95: 2-га укр. конф. з автоматичного керування. — Львів: НВЦ ІТІС, 1995. — Т. 2. — С. 71–72.

2. Кравець І. І. Дослідження складних водопостачальних систем великих міст // Ринок інсталяційний. — 1997. — № 1. — С. 12.
3. Кравець І. І., Глова З. В., Опотяк Ю. В. та ін. Моніторна система управління технологічними процесами // ІТІС-93: Перша міжнар. конф. з інформаційних технологій і систем. — Львів: НВЦ ІТІС, 1994. — Т. 1. — С. 30–31.
4. Кравець І. І., Глова З. В., Ралько Р. М. та ін. Інформаційна система для автоматичного контролю корозійного стану технологічного обладнання // ІТІС-93: Перша міжнар. конф. з інформаційних технологій і систем. — Львів: НВЦ ІТІС, 1994. — Т. 1. — С. 27–28.
5. Кравець І. І., Глова З. В., Ралько Р. М. та ін. Телеметрична система аеростатичних досліджень параметрів атмосфери // ІТІС-93: Перша міжнар. конф. з інформаційних технологій і систем. — Львів: НВЦ ІТІС, 1994. — Т. 1. — С. 55–56.
6. Опотяк Ю. В. Программно-аппаратный комплекс потоковой обработки информации на базе однородных вычислительных сред // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 31–35.

SCALABLE DATA GATHERING SYSTEMS AND THEIR IMPLEMENTATION ONBOARD FLYING SPACE STATIONS

I. I. Kravets, and Yu. V. Opotiak

We discuss some problems arising in the creation of a highly-efficient open multilevel onboard system for gathering, transmission, preprocessing, and representation of information. The system allows its scaling and extension. It will be able to obtain information from certain blocks and systems of the flying space station (FSS), convey it to different scientific experiments carried out on the station, respond timely to any feasible onboard emergencies and accidents for analysis and decision making.

УДК 681.142.4

Обработка дискретных космических изображений в расширенном пороговом базисе

Ф. Э. Гече

Ужгородський державний університет,

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури (філія), Ужгород

Надійшла до редакції 02.03.98

Розроблений метод представлення дискретних складних космічних зображень в розширеному пороговому базисі. Згідно з цим методом з кожним бінарним зображенням зіставляється впорядкований набір інформаційних векторів, які кодують р-фрагменти зображення з високим коефіцієнтом стиску. На множині пар інформаційних векторів визначені функціонали μ^* і μ_* , за допомогою яких вдається формалізувати поняття «подібності» і «відмінності» дискретних зображень. Описані інваріанти дискретних зображень в розширеному пороговому базисі відносно деяких групових перетворень.

Выбор базиса представления дискретных сложных изображений больших размеров (аэрокосмические снимки, рентгенограммы) занимает центральное место в их обработке. Это прежде всего связано с тем, что от выбранного базиса зависит эффективность методов сжатия и выделения математических признаков в изображениях, что очень важно для бортовых космических исследовательских систем. В данной работе в качестве базиса представления дискретных изображений выбирается расширенный пороговый базис, позволяющий кодировать р-фрагменты изображения с высоким коэффициентом сжатия и разработать эффективный метод выделения математических признаков.

1. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗ ТЕОРИИ МАТРИЦ ТОЛЕРАНТНОСТИ

Пусть $Z_2 = \{0, 1\}$ и Z_2^n — n -я декартова степень множества Z_2 . Определим на Z_2^n отношение толерантности τ . $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \tau (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \Leftrightarrow \exists i (\alpha_i = \beta_i)$. Максимальное подмножество $N \subset Z_2^n$, элементы которого попарно толерантны, называется

классом толерантности. Множество, состоящее из всех классов толерантности относительно τ , обозначим M_τ . Составим всевозможные матрицы, строками которых будут N -мерные булевы векторы, являющиеся элементами класса толерантности $N \subset M_\tau$, т. е. $N \rightarrow N_\xi$ — матрица, нумерация строк в которой определяется элементом ξ симметрической группы S_m , $m = |N|$ — мощность класса N . Пусть $S(N) = \bigcup_{\xi \in S_m} N N_\xi$, $M = \bigcup_{N \in M_\tau} S(N)$ и Ω_n — множество всех N -мерных вещественных векторов w , таких, что для всех различных $x_1, x_2 \in Z_2^n$ $x_1 \cdot w^T \neq x_2 \cdot w^T$, где T — соответственно символы транспонирования матриц и матричного умножения. В работе [1] показано, что если $N = (\alpha_{ij}) \in M$, $N^* = (\alpha_{sj}^*)$, $s = 2^{n-1} - i + 1$, $\alpha_{sj}^* = \bar{\alpha}_{ij}$ — булево отрицание α_{ij} ($|N| = 2^{n-1}$), то для любого $w \in \Omega_n$ можно указать такую матрицу $L_w \in M$, которая удовлетворяет условию

$$\begin{pmatrix} L_w \\ L_w^* \end{pmatrix} \cdot w^T = c_w^T, \quad (1)$$

где $\mathbf{c}_w = (c_1, \dots, c_t)$, $t = 2^n$, $c_1 > c_2 > \dots > c_t$. Введем обозначение $\mathbf{E}_n = \bigcup_{w \in \Omega_n} \mathbf{L}_w \subset M$, где матрица $\mathbf{L}_w$ удовлетворяет (1).

Предматрицей толерантности $\mathbf{L}'$ называется матрица, строками которой являются первые по порядку q строк матрицы толерантности $\mathbf{L} \in M$, и пишем $\mathbf{L}' = \mathbf{L}(q)$ или $\mathbf{L}' \triangleleft \mathbf{L}$. Множество всех предматриц матрицы толерантности $\mathbf{L} \in M$ обозначим $\langle \mathbf{L} \rangle$ и $\langle \mathbf{E}_n \rangle = \bigcup_{\mathbf{L} \in \mathbf{E}_n} \langle \mathbf{L} \rangle$.

Определим действия элементов $\mathbf{b} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \in Z_2^n$, $\sigma \in S_n$ на множество $A \subseteq Z_2^n$ и на $(n+1)$ -мерный действительный вектор $\mathbf{w} = (\omega_1, \dots, \omega_n; \omega_0)$ так:

$$\mathbf{b}A = \{(\beta_1 \oplus \alpha_1, \dots, \beta_n \oplus \alpha_n) \mid (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in A\},$$

$$\Lambda^\sigma = \{(\alpha_{\sigma(1)}, \dots, \alpha_{\sigma(n)}) \mid (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in A\},$$

$$\mathbf{b}\mathbf{w} = ((-1)^{\beta_1} \omega_1, \dots, (-1)^{\beta_n} \omega_n; \omega_0^b),$$

$$\mathbf{w}^\sigma = (\omega_{\sigma(1)}, \dots, \omega_{\sigma(n)}; \omega_0),$$

где $\oplus$ — сумма по mod 2, $\omega_0^b = \omega_0 - \sum_{i \in I(b)} \omega_i$,

$I(\mathbf{b}) = \{i \mid \beta_i = 1\}$. Вектор $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n)$ будем называть 2-суммирующим вектором (вектором суммирования по mod 2) множества булевых векторов $A \subseteq Z_2^n$, если каждая координата d_i ($i = 1, 2, \dots, n$) допускает одно из представлений:

а) $d_i = 2^{n-i} + 2^{n-i_1} + \dots + 2^{n-i_t}$, $i, i_1, \dots, i_t \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \neq i_t \forall t \in \{1, 2, \dots, n\}$ и $i_r \neq i_s$ если $r \neq s$;

б) $d_i = 2^{n-i}$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ и действие $\dot{+}$ вектора $\mathbf{d}$ на A задается так:

а) если i -я координата $d_i = 2^{n-i} + 2^{n-i_1} + \dots + 2^{n-i_t}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), то $\mathbf{d} \dot{+} A = \{(\alpha'_1, \dots, \alpha'_i, \dots, \alpha'_n) \mid \alpha'_i = \alpha_i \oplus \alpha_{i_1} \oplus \dots \oplus \alpha_{i_t}; (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in A\}$.

б) если i -я координата $d_i = 2^{n-i}$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ то $\mathbf{d} \dot{+} A = \{(\alpha'_1, \dots, \alpha'_i, \dots, \alpha'_n) \mid \alpha'_i = \alpha_i; (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in A\}$;

Всюду в дальнейшем примем, что если $A \subseteq Z_2^n$, то $(\mathbf{A})$ — матрица, строками которой являются элементы A и $(\mathbf{b}A) = \mathbf{b}(\mathbf{A})$, $(\mathbf{A}^\sigma) = (\mathbf{A})^\sigma$. Если $\Omega_n = \{(\omega_1, \dots, \omega_n) \in \Omega_n \mid 0 < \omega_1 < \dots < \omega_n\}$, $\mathbf{L}_w$ — матрица, удовлетворяющая условию (1), и $\mathbf{E}_n = \bigcup_{w \in \Omega_n} \mathbf{L}_w$, то в работе [1] показано, что $\mathbf{E}_n = \{(\mathbf{g}\mathbf{L})^\sigma \mid \mathbf{L} \in \mathbf{E}_n^-, \mathbf{g} \in Z_2^n, \sigma \in S_n\}$, а это влечет

$$\langle \mathbf{E}_n \rangle = \{(\mathbf{g}\mathbf{L})^\sigma \mid \mathbf{L} \in \langle \mathbf{E}_n^- \rangle, \mathbf{g} \in Z_2^n, \sigma \in S_n\}.$$

Рассмотрим множество матриц толерантности

$$\mathbf{L}_1 = (0_1), \mathbf{L}_2 = \begin{pmatrix} L_1 & 0_1 \\ L_1^* & 0_1 \end{pmatrix}, \dots, \mathbf{L}_n = \begin{pmatrix} L_{n-1} & 0_{n-1} \\ L_{n-1}^* & 0_{n-1} \end{pmatrix}, \text{ где } 0_i$$

— нулевой столбец длины 2^{i-1} . Определим над предматрицами толерантности $(\mathbf{L}_i(q_i) \underbrace{0 \dots 0}_{n-i})$,

$(\mathbf{L}_j(q_j) \underbrace{0 \dots 0}_{n-j})$ операцию ∇ так:

$$(\mathbf{L}_i(q_i) 0 \dots 0) \nabla (\mathbf{L}_j(q_j) 0 \dots 0) = \begin{pmatrix} (\mathbf{L}_i(q_i) 0 \dots 0) \\ (\mathbf{L}_j(q_j) 0 \dots 0) \end{pmatrix}.$$

Здесь нулевой столбец 0 в предматрице толерантности $(\mathbf{L}_i(q_i) 0 \dots 0)$ имеет длину q_i .

Пусть $A \subseteq Z_2^n$ и $\mathbf{a} \in A$. Максимальное подмножество $p\{\mathbf{a}A\} \subseteq \mathbf{a}A$, которое удовлетворяет условию

$$(p\{\mathbf{a}A\})^\sigma =$$

$$= (\mathbf{L}_j, 0_j, \dots, 0_j) \nabla \left(\bigvee_{i=0}^{n-j} (\mathbf{L}_{j+i}(q_i) \underbrace{0 \dots 0}_{n-(j+i)}) \right), \quad (2)$$

будем называть p -множеством A относительно $\mathbf{a}$ с индексом j и параметром $\sigma \in S_n$, если $q_n \geq q_1 \geq \dots \geq q_{n-j}$. Элемент $\sigma \in S_n$ в (2) может определяться неоднозначно. Чтобы устранить неоднозначность выбора $\sigma \in S_n$, введем в рассмотрение функцию $s_i: A \rightarrow \{1, 2, \dots, n\}$ определенную так:

$$\forall \mathbf{a} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in A \quad s_i(\mathbf{a}) = \alpha_i,$$

$$s_i(A) = \sum_{\mathbf{a} \in A} s_i(\mathbf{a}),$$

и множество $I_{\mathbf{a}} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, $\forall i \in I_{\mathbf{a}} \quad \mathbf{e}_i = (0, \dots, 0, \underbrace{1}_{(i)}, 0, \dots, 0) \in \mathbf{a}A$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \mid I_{\mathbf{a}} \mathbf{e}_i \notin \mathbf{a}A$.

Элемент σ всюду в дальнейшем будем выбирать следующим образом:

$$\forall i, j \in I_{\mathbf{a}} \quad s_i(\mathbf{a}A) > s_j(\mathbf{a}A) \Rightarrow s_i((\mathbf{a}A)^\sigma) > s_j((\mathbf{a}A)^\sigma),$$

$$\forall i, j \in I_{\mathbf{a}} \quad s_i(\mathbf{a}A) = s_j(\mathbf{a}A)$$

$$\text{и } i < j \Rightarrow \sigma(i) < \sigma(j), \quad (3)$$

$$\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \mid I_{\mathbf{a}} \quad i < j \Rightarrow \sigma(i) < \sigma(i)$$

и назовем его подходящим параметром p -множества $p\{\mathbf{a}A\}$.

Вектор суммирования по mod 2 $\mathbf{a}^*$ множества $\mathbf{aA}$ будем называть p -максимизатором этого множества, если $|p\{\mathbf{a}^* + \mathbf{aA}\}| \geq |p\{\mathbf{d} + \mathbf{aA}\}|$, где $\mathbf{d}$ — произвольный 2-суммирующий вектор множества $\mathbf{aA}$. Если p -максимизатор $\mathbf{a}^*$ множества $\mathbf{aA}$ является единственным, то разработан алгоритм однозначного выбора p -максимизатора, который называется подходящим p -максимизатором. В дальнейшем введем обозначение $p\{\tilde{\mathbf{a}}A\} = p\{\mathbf{a}^* + \mathbf{aA}\}$, где $\mathbf{a}^*$ — подходящий p -максимизатор.

Теорема 1. Пусть $A \subseteq Z_2^n$ и $\mathbf{a} \in A$. Тогда в $\langle E_n^- \rangle$ найдутся такие элементы $\mathbf{L}, \mathbf{N}$, что

- 1) $\mathbf{L} = (p\{\tilde{\mathbf{a}}A\})^\sigma$, если $|p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}| \leq 2^{n-1}$;
- 2) $(p\{\tilde{\mathbf{a}}A\})^\sigma \triangleleft (\mathbf{N} \nabla \mathbf{N}^*)$, когда $|p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}| > 2^{n-1}$.

Доказательство. Рассмотрим случай $|p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}| \leq 2^{n-1}$. Покажем, что существует вектор $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_2) \in \Omega_n^-$, удовлетворяющий условию

$$\forall \mathbf{x} \in p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}, \forall \mathbf{y} \in Z_2^n \mid p\{\tilde{\mathbf{a}}A\} \quad \mathbf{x} \cdot \mathbf{u}^T > \mathbf{y} \cdot \mathbf{u}^T. \quad (4)$$

Согласно (2) и теореме 5 [3] вектор $\mathbf{w} = (\omega_1, \dots, \omega_n)$:

- а) $\omega_1 = -1, \omega_2 = \omega_1 - 1, \dots, \omega_j = \sum_{i=1}^{j-1} \omega_i - 1$;
- б) компоненты $\omega_{j+s}, s = 1, 2, \dots, t, t$ — такое наименьшее целое положительное число, что $q_t \neq 0$ и $q_{t+1} = \dots = q_{n-j} = 0$, последовательно находим из равенств

$$\mathbf{a}_{q_s}^{j+s} \cdot (\omega_1, \dots, \omega_{j+s})^T = \mathbf{a}_{q_{s-1}}^{j+s-1} \cdot (\omega_1, \dots, \omega_{j+s-1})^T,$$

где $\mathbf{a}_{q_s}^{j+s}$ — q_s -я строка матрицы $\mathbf{L}_{j+s}^*$;

- в) $\omega_{j+t+1} = \dots = \omega_n = \mathbf{a}_{q_t}^{j+t} \cdot (\omega_1, \dots, \omega_{j+t})^T - 1$, удовлетворяет условию (4), но $\mathbf{w} \notin \Omega_n^-$.

Положим $u_i = \omega_i, i = 1, 2, \dots, j$ и $u_{j+k} = \omega_{j+k} - 2^{-k}, k = 1, 2, \dots, n-j$. Тогда $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n) \in \Omega_n^-$ и удовлетворяет (4). Значит, если $q = |p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}|$ — мощность p -множества и $\mathbf{L}_u$ удовлетворяет условию (1), то $(p\{\tilde{\mathbf{a}}A\})^\sigma = \mathbf{L}_u \in \langle E_n^- \rangle$.

В случае $|p\{\tilde{\mathbf{a}}A\}| > 2^{n-1}$ вектор $\mathbf{u}$ построим аналогично и положим $\mathbf{N} = \mathbf{L}_u \in \langle E_n^- \rangle$. Тогда в силу (4) и по лемме 3 с работы [3] имеем $(p\{\tilde{\mathbf{a}}A\})^\sigma \triangleleft (\mathbf{N} \nabla \mathbf{N}^*)$, что и требовалось доказать.

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАСШИРЕННОМ ПОРОГОВОМ БАЗИСЕ

Пусть рецепторное поле, размеров $2^r \times 2^s$, содержит нормализованное [2] бинарное изображение A' и $n = r + s$. По некоторому взаимно-однозначному

закону ϕ каждому рецептору сопоставим n -мерный булевый вектор $(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in Z_2^n$ и через A обозначим множество всех тех булевых векторов, которые соответствуют рецепторам, занятым изображением A' , т. е. $\phi(A') = A \subseteq Z_2^n$. Пусть $\mathbf{a} \in A$ и $p\{\tilde{\mathbf{a}}A\} = p\{\mathbf{a}^* + \mathbf{aA}\}$ — p -множество A относительно $\mathbf{a}$. Рассмотрим отображение $P_a^\sigma: A \rightarrow \langle P_a^\sigma\{A\} \rangle \in \langle E_n^- \rangle$, которое задается так:

$$\forall \mathbf{b} \in A \ P_a^\sigma: \mathbf{b} \rightarrow \mathbf{b}, \text{ если } [\tilde{\mathbf{a}}\mathbf{b}]^\sigma \in p\{[\tilde{\mathbf{a}}A]^\sigma\},$$

$$\forall \mathbf{b} \in A \ P_a^\sigma: \mathbf{b} \rightarrow \tilde{\mathbf{a}}, \text{ если } [\tilde{\mathbf{a}}\mathbf{b}]^\sigma \notin p\{[\tilde{\mathbf{a}}A]^\sigma\},$$

и номер строки $\mathbf{b}$ в матрице $(P_a^\sigma\{A\})$ совпадает с номером строки $[\tilde{\mathbf{a}}\mathbf{b}]^\sigma$ матрицы $(p\{[\tilde{\mathbf{a}}A]^\sigma\})$, когда $[\tilde{\mathbf{a}}\mathbf{b}]^\sigma \in p\{[\tilde{\mathbf{a}}A]^\sigma\}$, а в противном случае равен 1.

Определение. Точки $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$ назовем точками разложения бинарного изображения A' в расширенном пороговом базисе, если

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, t\} \ P_{\mathbf{a}_i}^\sigma\{A\} \not\subset \bigcup_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^t P_{\mathbf{a}_j}^\sigma\{A\}. \quad (5)$$

Если точки $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$ удовлетворяют (5) и

$$A = \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^\sigma\{A\}, \quad (6)$$

то будем говорить, что эти точки образуют полную систему точек разложения двумерного бинарного изображения A' . Множество A однозначно представляется в виде (6) относительно полной системы точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$, так как $\mathbf{a}_1^*, \dots, \mathbf{a}_t^*, \sigma_1, \dots, \sigma_t$ — соответствующие подходящие параметры.

В силу построения отображения P_a^σ для множества $P_a^\sigma\{A\}$ по теореме 5 [3] можно построить такой $(n+1)$ -мерный целочисленный вектор $\mathbf{w} = (\omega_1, \dots, \omega_n, \omega_0)$, что

$$\mathbf{b} = (\beta_1, \dots, \beta_n) \in P_a^\sigma\{A\} \Leftrightarrow w(\mathbf{b}) \geq 0, \quad (7)$$

где $w(\mathbf{b}) = \omega_1\beta_1 + \dots + \omega_n\beta_n - \omega_0$. Алгоритм, который согласно теореме 5 [3] реализует отображение $P\{A\} \rightarrow \mathbf{w}$, обозначим через F . Примем

$$P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t}: A \rightarrow \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i}\{A\},$$

$$F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t}: A \rightarrow (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_t), \quad (8)$$

где $F: P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i}\{A\} \rightarrow \mathbf{w}_i$.

Определение. Отображение (8) называется представлением двумерного бинарного изображения A'

относительно точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$ в расширенном пороговом базисе. Представление двумерного бинарного изображения в расширенном пороговом базисе будем называть точным относительно $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$, если эти точки образуют полную систему точек разложения для A' .

Теорема 2. Нормализованные двумерные бинарные изображения A'_1, A'_2 идентичны тогда и только тогда, когда существуют такие точки разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A_1 \cap A_2$, что совпадают их точные представления в расширенном пороговом базисе.

Доказательство. Необходимость. Если нормализованные двумерные бинарные изображения A'_1 и A'_2 идентичны, то $A_1 = A_2$, а это непосредственно влечет

$$\forall \mathbf{a}_i \in A_1 \quad P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_1\} = P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_2\}. \quad (9)$$

Следовательно, если точки $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A_1$ такие, что

$$A_1 = \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_1\}, \text{ то } A_2 = \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_2\}.$$

В силу теоремы 5 [3] и (9) алгоритм F каждому множеству $P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_j\}$ ($i = 1, 2$) однозначно ставит в соответствие один и тот же вектор $\mathbf{w}_i$. Отсюда

$$F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_1\} = F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_2\} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_t),$$

и тем самым необходимость доказана.

Достаточность. Из того, что упорядоченный набор векторов $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_t)$ задает точное представление бинарных изображений A'_1, A'_2 в расширенном пороговом базисе относительно точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$ следует

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, t\} \quad \mathbf{w}_i = F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_1\} =$$

$$= F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} \{A_2\} =$$

$$= \begin{cases} P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_1\} = \{\mathbf{a} \in Z_2^n \mid \mathbf{w}_i(\mathbf{a}) \geq 0\}, \\ P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_2\} = \{\mathbf{a} \in Z_2^n \mid \mathbf{w}_i(\mathbf{a}) \geq 0\}, \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_1\} = P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_2\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_1\} = \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A_2\} \Rightarrow A_1 = A_2.$$

Значит, A'_1 и A'_2 — идентичные бинарные изображения. Теорема доказана.

Пусть $F: P_{\mathbf{a}}^{\sigma} \{A\} \rightarrow \mathbf{w}$ и $F_k: P_{\mathbf{a}}^{\sigma} \{A\} \rightarrow (\mathbf{a}\mathbf{w})^{\sigma}$.

Определение. Каноническим представлением двумерного бинарного изображения A' относительно

точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$ называется отображение $F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t}$, определенное так:

$$F \circ P_{\mathbf{a}_1 \dots \mathbf{a}_t}^{\sigma_1 \dots \sigma_t} : A \rightarrow$$

$$\rightarrow F_k : \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}}^{\sigma} \{A\} \rightarrow (\mathbf{a}_1 \mathbf{w}_1)^{\sigma_1}, \dots, (\mathbf{a}_t \mathbf{w}_t)^{\sigma_t}.$$

Каноническое представление бинарного изображения A' называется точным относительно $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$, если эти точки образуют полную систему точек разложения для A' .

Переход от канонического представления к представлению бинарных изображений в расширенном пороговом базисе осуществляется преобразованием

$\mathbf{w}_i = \mathbf{a}_i \left(\mathbf{w}_i^{\sigma_i^{-1}} \right)$, $i = 1, 2, \dots, t$. Это влечет следующий результат.

Теорема 3. Нормализованные двумерные бинарные изображения A_1 и A_2 идентичны тогда и только тогда, когда существуют такие точки разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A_1 \cap A_2$, что совпадают их точные канонические представления в расширенном пороговом базисе.

Пусть p -множество $p\{\tilde{\mathbf{a}}_i A\}$ множества A имеет индекс j_i , т. е.

$$(p\{\tilde{\mathbf{a}}_i A\})^{\sigma_i} = (\mathbf{L}_{j_i} 0_{j_i} \dots 0_{j_i}) \nabla \left(\bigvee_{r=0}^{n-j_i} (\mathbf{L}_{j_i+r}^{\sigma_i}(q_r) 0_{n-(j_i+r)} \dots 0) \right).$$

Нетрудно заметить, что

$$F: p\{\tilde{\mathbf{a}}_i A\}^{\sigma_i} \rightarrow \mathbf{w}_i^k = (\omega_1^{ik}, \dots, \omega_{j_i}^{ik}, \dots, \omega_n^{ik}; \omega_0^{ik}),$$

$$F: P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\} \rightarrow \mathbf{w}_i^k = (\omega_1^{ik}, \dots, \omega_{j_i}^{ik}, \dots, \omega_n^{ik}; \omega_0^{ik}).$$

Каждому $\mathbf{w}_i^k$ однозначно сопоставим $(n - j_i + 1)$ -мерный вектор $\mathbf{v}_i = (v_1^i, \dots, v_{n-j_i+1}^i)$ так:

- 1) если $j_i \neq 0$, то $v_r^i = \omega_{j_i+r-1}^{ik} - \omega_0^{ik}$, $r = 1, 2, \dots, n - j_i + 1$,
- 2) если $j_i = 0$, то положим $\mathbf{v}_i = (-1, -1, \dots, -1)$ — $(n + 1)$ -мерный вектор.

Вектор $\mathbf{v}_i$ назовем информационным вектором $p\{\tilde{\mathbf{a}}_i A\}$ и через $\lambda(\mathbf{v}_i)$ обозначим его размерность.

Пусть A'_1, A'_2 — двумерные бинарные изображения, размеров $2^r \times 2^s$ ($n = r + s$), $p\{\tilde{\mathbf{a}}_1 A_1\}$, $p\{\tilde{\mathbf{a}}_2 A_2\}$ — p -множества соответствующих множеств A_1, A_2 относительно точки $\mathbf{a}$ с индексами j_1, j_2 и $\mathbf{v}_1 = (v_1^1, \dots, v_{n-j_1+1}^1)$, $\mathbf{v}_2 = (v_1^2, \dots, v_{n-j_2+1}^2)$ — соответствующие им информационные векторы. Будем гово-

речь, что информационный вектор $\mathbf{v}_1$ p -множества $p\{\tilde{\mathbf{a}}A_1\}$ предшествует информационному вектору $\mathbf{v}_2$ p -множества $p\{\tilde{\mathbf{a}}A_2\}$ ($\mathbf{v}_1 \prec \mathbf{v}_2$), если

- 1) $\lambda(\mathbf{v}_1) \geq \lambda(\mathbf{v}_2)$,
- 2) $v_{m+t}^1 \leq v_t^2$, $i = 1, 2, \dots, \lambda(\mathbf{v}_2)$, где $m = \lambda(\mathbf{v}_1) - \lambda(\mathbf{v}_2)$.

Теорема 4. Пусть подходящие p -максимизаторы и параметры σ_1 , σ_2 для p -множеств $H_1 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_1\}$, $H_2 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_2\}$ равны, и $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ — соответствующие им информационные векторы, тогда $\mathbf{v}_1 \prec \mathbf{v}_2 \Rightarrow H_1 \subseteq H_2$.

Доказательство. По определению p -множеств H_i :

$$(H_i)^{\sigma_i} = (\mathbf{L}_{ji} 0_{ji} \dots 0_{ji}) \nabla \left(\bigvee_{r=0}^{n-j_i} \mathbf{L}_{ji+r}^* (q_r^i) \underset{n-(j_i+r)}{0 \dots 0} \right), \quad (10)$$

$i = 1, 2$. Число строк q_t^i предматрицы толерантности $\mathbf{L}_{ji}^* (q_t^i)$ и $(t+1)$ -я координата v_{t+1}^i информационного вектора $\mathbf{v}_i$ p -множества H_i связаны равенством $q_t^i = v_{t+1}^i + 1$. Значит,

$$\mathbf{v}_1 \prec \mathbf{v}_2 \Rightarrow v_{m+t+1}^1 \leq v_{t+1}^2 \Rightarrow q_{m+t}^1 \leq q_t^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (\mathbf{L}_{j_1+m+t}^* (q_{m+t}^1) 0 \dots 0) \triangleleft (\mathbf{L}_{j_2+t}^* (q_t^2) 0 \dots 0),$$

где $m = \lambda(\mathbf{v}_1) - \lambda(\mathbf{v}_2)$ и $t \in \{0, 1, \dots, \lambda(\mathbf{v}_2) - 1\}$.

Из (10) и из того, что подходящие p -максимизаторы p -множеств H_1 , H_2 и их параметры σ_1 и σ_2 совпадают, на основании $(\mathbf{L}_{j_1+m-t}^* (q_{m-t}^1) 0 \dots 0) \triangleleft (\mathbf{L}_{j_2-t}^* 0 \dots 0)$ ($t = 1, 2, \dots, m$) заключаем $H_1 \subseteq H_2$.

Теорема доказана.

На множестве действительных чисел R зададим функции $g: R \rightarrow Z_2$, $h: R \rightarrow Z_2$ так:

$$g(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{если } x < 0, \end{cases} \quad h(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \neq 0, \\ 0, & \text{если } x = 0 \end{cases}$$

и на паре информационных векторов $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ соответствующих p -множеств $H_1 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_1\}$, $H_2 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_2\}$ определим функционалы μ , ν пусть $\lambda(\mathbf{v}_1) \geq \lambda(\mathbf{v}_2)$ и $m = \lambda(\mathbf{v}_1) - \lambda(\mathbf{v}_2)$, тогда

$$\begin{aligned} \mu(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) &= \sum_{t=1}^{\lambda(\mathbf{v}_2)} [g(v_{m+t}^1)(v_{m+t}^1 + 1) - g(v_t^2)(v_t^2 + 1)] + \\ &+ \sum_{t=1}^m (2^{n-\lambda(\mathbf{v}_2)-t} - v_{m-t+1}^1 - 1), \\ \nu(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) &= h(N - \lambda(\mathbf{v}_1) + 1) 2^{N - \lambda(\mathbf{v}_1)} \end{aligned}$$

$$+ \sum_{t=1}^{\lambda(\mathbf{v}_2)} (\min\{v_{m+t}^1, v_t^2\} + 1) + \sum_{t=1}^m (v_{m-t+1}^1 + 1),$$

где $|c|$ — модуль действительного числа c , $\sum_{t=1}^0 (\dots) = 0$.

Теорема 5. Пусть подходящие p -максимизаторы и параметры σ_1 , σ_2 p -множеств $H_1 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_1\}$, $H_2 = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_2\}$ равны, $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ — соответствующие им информационные векторы и

$$\mu^*(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \frac{\nu(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}{\mu(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) + \nu(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}.$$

Тогда $|H_1 \cap H_2| = |H_1 \cup H_2| \mu^*(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ ($|H_i|$ — число элементов множества H_i).

Доказательство. Для определенности положим $\lambda(\mathbf{v}_1) \geq \lambda(\mathbf{v}_2)$, $\lambda(\mathbf{v}_1) = n - j_1 + 1$ и $m = \lambda(\mathbf{v}_1) - \lambda(\mathbf{v}_2)$. Из построения p -множеств $H_i = p\{\tilde{\mathbf{a}}A_i\}$ ($i = 1, 2$) следует

$$\begin{aligned} (H_1)^{\sigma_1} &= (\mathbf{L}_{j_1} 0_{j_1} \dots 0_{j_1}) \nabla (\mathbf{L}_{j_1}^* (q_0^1) 0 \dots 0) \nabla \dots \\ &\nabla (\mathbf{L}_{j_1+m-1}^* (q_{m-1}^1) 0 \dots 0) \nabla \\ &\nabla \left(\bigvee_{r=m}^{n-j_1} (\mathbf{L}_{j_1+r}^* (q_r^1) 0 \dots 0) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (H_2)^{\sigma_2} &= (\mathbf{L}_{j_2} 0_{j_2} \dots 0_{j_2}) \nabla (\mathbf{L}_{j_2}^* 0_{j_2} \dots \\ &0_{j_2}) \nabla \dots \nabla (\mathbf{L}_{j_2-1}^* 0_{j_2-1} \dots 0_{j_2-1}^1) \nabla \\ &\nabla \left(\bigvee_{r=0}^{n-j_2} (\mathbf{L}_{j_2+r}^* (q_r^2) 0 \dots 0) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Пусть $\{(\mathbf{L}_{j_1} 0_{j_1} \dots 0_{j_1})\}$ множество, элементами которого являются строки матрицы $(\mathbf{L}_{j_1} 0_{j_1} \dots 0_{j_1})$. Тогда из того, что $q_{m+t-1}^1 \leq q_{t-1}^2$ или $q_{m+t-1}^1 > q_{t-1}^2$ и $q_{t-1}^2 = v_t^2 + 1$, ($t \in \{1, 2, \dots, \lambda(\mathbf{v}_2)\}$), имеем

$$\begin{aligned} &|g(v_{m+t}^1)(v_{m+t}^1 + 1) - g(v_t^2)(v_t^2 + 1)| = \\ &= \|(\mathbf{L}_{j_2+t}^* (q_t^2) 0 \dots 0) \Delta [(\mathbf{L}_{j_1+m+t}^* (q_{m+t}^1) 0 \dots 0)]\| \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} &|g(v_{m+t}^1)(v_{m+t}^1 + 1) - g(v_t^2)(v_t^2 + 1)| = \\ &= \|[(\mathbf{L}_{j_1+m+t}^* (q_{m+t}^1) 0 \dots 0)] \Delta [(\mathbf{L}_{j_2+t}^* (q_t^2) 0 \dots 0)]\|. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} &|g(v_{m+t}^1)(v_{m+t}^1 + 1) - g(v_t^2)(v_t^2 + 1)| = \\ &= \|[(\mathbf{L}_{j_1+m+t}^* (q_{m+t}^1) 0 \dots 0)] \Delta [(\mathbf{L}_{j_2+t}^* (q_t^2) 0 \dots 0)]\|, \end{aligned} \quad (13)$$

где Δ — симметрическая разность множеств. Из (11) следует $q_s^1 < 2^{j+s-1}$, $s = 0, 1, 2, \dots, m-1$. Значит, $\forall s \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$

$$\begin{aligned} |(\mathbf{L}_{j+s}^* (q_s^1) 0 \dots 0)| &\subset |(\mathbf{L}_{j+s}^* 0_{j+s} \dots 0_{j+s})| \text{ и} \\ |(\mathbf{L}_{j+s}^* 0_{j+s} \dots 0_{j+s})| \Delta |(\mathbf{L}_{j+s}^* (q_s^1) 0 \dots 0)| &= \\ &= 2^{j+s-1} - (v_{s+1}^1 + 1). \end{aligned} \quad (14)$$

Из того, что подходящие p -максимизаторы и элементы σ_1, σ_2 для p -множеств H_1 и H_2 совпадают, на основании (11)–(14) заключаем

$$\begin{aligned} |H_1 \Delta H_2| &= \sum_{t=1}^m (2^{n-\lambda(v_2)-t} - v_{m-t+1}^1 - 1) + \\ &+ \sum_{t=1}^{\lambda(r_2)} |g(v_{m+t}^1)(v_{m+t}^1 + 1) - g(v_t^2)(v_t^2 + 1)| \mu(v_1, v_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Предматрицы толерантности $(\mathbf{L}_r^*(q_r) 0 \dots 0)$, $(\mathbf{L}_s^*(q_s) 0 \dots 0)$ удовлетворяют условию $r \neq s \Rightarrow \left[(\mathbf{L}_r^*(q_r) 0 \dots 0) \cap (\mathbf{L}_s^*(q_s) 0 \dots 0) \right] = \emptyset$.

Отсюда в силу того, что подходящие p -максимизаторы и элементы σ_1, σ_2 для H_1 и H_2 совпадают, на основании (11), (12) имеем

$$\begin{aligned} |H_1 \cap H_2| &= |(\mathbf{L}_h 0_h \dots 0_h)| + \sum_{t=1}^m |(\mathbf{L}_{j+m-t}^* (q_{m-t}^1) 0 \dots 0)| + \\ &+ \sum_{t=1}^{\lambda(r_2)} |[(\mathbf{L}_{j+m+t-1}^* (q_{m+t-1}^1) 0 \dots 0) \cap (\mathbf{L}_{j+t-1}^* (q_t^2) 0 \dots 0)]| = \\ &= h(j_1) 2^{j-1} + \sum_{t=1}^m (v_{m-t+1}^1 + 1) + \\ &+ \sum_{t=1}^{\lambda(r_2)} (\min\{v_{m+t}^1, v_t^2\} + 1) = v(v_1, v_2). \end{aligned} \quad (16)$$

Из неравенств (15) и (16) непосредственно следует

$$\begin{aligned} |H_1 \cap H_2| &= |H_1 \cup H_2| \frac{|H_1 \cap H_2|}{|H_1 \cup H_2|} = \\ &= |H_1 \cup H_2| \frac{|H_1 \cap H_2|}{|H_1 \nabla H_2| + |H_1 \cap H_2|} = |H_1 \cup H_2| \mu^*(v_1, v_2). \end{aligned}$$

Итак, теорема доказана.

Определим функционал μ_* на паре (v_1, v_2) информационных векторов p -множеств H_1, H_2 так:

$$\mu_*(v_1, v_2) = \frac{\mu(v_1, v_2)}{\mu(v_1, v_2) + v(v_1, v_2)}.$$

Нетрудно заметить, что функционалы μ_* , μ^* удовлетворяют следующим условиям:

- 1) на любой паре информационных векторов (v_1, v_2) соответствующих p -множеств H_1, H_2 $\mu_*(v_1, v_2), \mu^*(v_1, v_2) \in [0, 1]$;
- 2) $\mu^*(v_1, v_2) + \mu_*(v_1, v_2) = 1$;
- 3) если подходящие p -максимизаторы и параметры σ_1, σ_2 для p -множеств H_1, H_2 совпадают и $\mu^*(v_1, v_2) = 1$, то $H_1 = H_2$, а если $\mu^*(v_1, v_2) = 0$, то $H_1 \cap H_2 = \emptyset$.

Исходя из свойств 2), 3), функционал μ^* естественно назвать мерой «сходства», а μ_* — мерой «различия» p -множеств H_1, H_2 (p -фрагментов $\varphi^{-1}(H_1), \varphi^{-1}(H_2)$).

На основании изложенных выше результатов можно утверждать, что каждому двумерному бинарному изображению A' относительно полной системы точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$ однозначно сопоставляется упорядоченный набор $(H'_1, \dots, H'_t)$ p -фрагментов ($H'_i = \varphi^{-1}(H_i)$), которые, в свою очередь, кодируются информационными векторами $v_1, \dots, v_t$, т. е.

$$A' \rightarrow (H'_1, \dots, H'_t) \rightarrow (v_1, \dots, v_t). \quad (17)$$

Отображение (17) будем называть представлением двумерного бинарного изображения A' в пространстве информационных векторов относительно системы точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$. Информационные векторы $v_1, \dots, v_t$ p -фрагментов $(H'_1, \dots, H'_t)$ являются математическими признаками для изображения A' . Учитывая свойства функционалов μ^* , μ_* в пространстве информационных векторов можно определить степень «сходства» и «различия» бинарных изображений, которые могут быть успешно использованы при построении алгоритмов распознавания бинарных изображений.

Следует отметить, что представление p -фрагментов двумерных бинарных изображений в пространстве информационных векторов является весьма эффективным с точки зрения сжатия информации. Действительно, если H' — p -фрагмент бинарного изображения A' рецепторного поля размерами $2^r \times 2^s$ ($n = r + s$) относительно точки $\mathbf{a} \in A$ ($A = \varphi(A')$) и t — такое наименьшее неотрицательное число, что для $H = p\{\tilde{\mathbf{a}} A\}$ имеем $(H) = (\mathbf{L}_j 0_j \dots 0_j) \nabla (\bigvee_{r=0}^t \mathbf{L}_{j+r}^* (q_r) 0 \dots 0)$, то из $2^{j-1} > q_0 \geq q_1 \geq \dots \geq q_t$ и из построения информационного вектора

ВН непосредственно следует, что коэффициент сжатия χ_n p -фрагмента H' удовлетворяет неравенству $\chi_n \geq 2^n / (j(t+1) - 2(n - (j+t)))$.

В задачах обработки и распознавания дискретных изображений важное значение имеет нахождение инвариантов относительно допустимых преобразований. Ниже рассмотрим следующие преобразования бинарных изображений.

1. Пусть A' — исходное двумерное бинарное изображение рецепторного поля размерами $2^r \times 2^s$ ($n = r + s$), и $A = \varphi(A')$. Через $A'_i(\sigma)$ обозначим изображение $\varphi^{-1}(A^\sigma)$, где $\sigma \in S_n$.

2. $A'_i(\mathbf{b}) = \varphi^{-1}(\mathbf{b}A)$, где $\mathbf{b} \in Z_2^n$.

Пусть $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_t)$ — точное представление двумерного бинарного изображения A' в расширенном пороговом базисе относительно точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t$ и $\|\mathbf{w}_i\| = |\omega_1^i| + |\omega_2^i| + \dots + |\omega_n^i|$, где $\mathbf{w}_i = (\omega_1^i, \omega_2^i, \dots, \omega_n^i; \omega_0^i)$, $i = 1, 2, \dots, t$. Под нормой $\|A'\|$ бинарного изображения A' в расширенном пороговом базисе понимаем $\|\mathbf{w}_1\| + \|\mathbf{w}_2\| + \dots + \|\mathbf{w}_n\|$.

Теорема 6. Норма $\|A'\|$ бинарного изображения A' в расширенном пороговом базисе является инвариантной величиной относительно преобразований, порожденных симметрической группой S_n и абелевой группой Z_2^n .

Доказательство. Пусть $(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_t)$ — точное пороговое представление двумерного бинарного изображения A' относительно точек разложения $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_t \in A$, т. е.

$$A = \bigcup_{i=1}^t P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\}. \quad (18)$$

В силу (18)

$$\forall \sigma \in S_n \quad A^\sigma = \bigcup_{i=1}^t [(P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\})^\sigma], \quad (19)$$

$$\forall \mathbf{b} \in Z_2^n \quad \mathbf{b}A = \bigcup_{i=1}^t \mathbf{b} P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\}, \quad (20)$$

где $[(P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\})^\sigma]$ множество, элементами которого являются строки матрицы $(P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\})^\sigma$. Применив к правым частям (19) и (20) отображение F , получим

$$F: \bigcup_{i=1}^t [(P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\})^\sigma] \rightarrow (\mathbf{w}_1^\sigma, \dots, \mathbf{w}_t^\sigma),$$

$$F: \bigcup_{i=1}^t \mathbf{b} P_{\mathbf{a}_i}^{\sigma_i} \{A\} \rightarrow (\mathbf{b}\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{b}\mathbf{w}_t).$$

Отсюда с учетом $\|\mathbf{w}_i\| = \|\mathbf{w}_i^\sigma\| = \|\mathbf{b}\mathbf{w}_i\|$ имеем $\|A'\| = \|A'_i(\sigma)\| = \|A'_i(\mathbf{b})\|$.

Итак, теорема доказана.

ВЫВОДЫ

Метод представления двумерных сложных изображений позволяет решать следующие задачи:

- выделить математические признаки в изображениях;
- формализовать понятие «сходства» и «различия» бинарных изображений;
- разработать эффективный способ сжатия бинарных изображений;
- выделить области (детали) в изображениях;
- описать инварианты бинарных изображений относительно групповых преобразований рецепторного поля;
- разработать различные алгоритмы распознавания бинарных изображений, удовлетворяющих некоторым требованиям по точности представления и принятия решений.

Полученные в работе результаты могут быть обобщены на многоуровневых и многомерных дискретных изображениях.

1. Айзенберг Н. Н., Бовди А. А., Герго Э. Й. и др. Некоторые алгебраические аспекты пороговой логики // Кибернетика. — 1980. — № 2. — С. 26–30.
2. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений. — М.: Высш. шк., 1983. — 295 с.
3. Гече Ф. Э., Полишко В. П., Роботишин В. И. Реализация функций алгебры логики на пороговых элементах // Кибернетика. — 1983. — № 6. — С. 62–67.

PROCESSING OF DISCRETE SPACE IMAGES WITHIN BROADENED THRESHOLD BASE

F. E. Geche

A method for presentation of two-dimensional discrete images within a broadened threshold base has been elaborated. In this method, there is for every binary image a corresponding ordered set of information vectors which encode the image p -fragments with a high compressibility coefficient. On the set of information vector pairs the functionals μ^* and μ_* are determined, which are used to formalize the notions of «similarity» and «distinction» of discrete images. The invariants of discrete images within a broadened threshold base with respect to some group transformations are described.

УДК 519.681.5

Эффективные алгоритмы обработки космических изображений и их реализация на клеточных нейросетях

И. Н. Айзенберг

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури (філія), Ужгород

Надійшла до редакції 13.04.98

Розглядаються класичні клітинні нейромережі, а також клітинні нейромережі із багатозначних і універсальних нейроелементів. Описана низка оригінальних нелінійних фільтрів, їх застосування для фільтрації шуму і корекції частот. Розглядаються також алгоритми глобального точного виділення контурів за вузькими напрямками. Всі описані алгоритми реалізуються на клітинних нейромережах і ілюструються прикладами обробки космічних зображень.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшие задачи при обработке космических изображений — фильтрация шума (в частности, борьба со спекл-шумом на радиолокационных изображениях) и выделение мелких деталей. Применение нейросетевых технологий для решения этих задач очень актуально. Клеточные нейросети (CNN), введенные в работе [13], являются отличным аппаратом для решения различных задач обработки и распознавания изображений. CNN — это двумерный массив нейроэлементов размерности $N \times M$. Каждый нейрон в такой сети соединен только с нейронами из своей ближайшей $(n \times m)$ -окрестности. Такая конструкция сети удобна для реализации алгоритмов фильтрации в пространственной области. Существует целый ряд подобных применений непрерывных CNN (CCNN) [13]. Дискретные CNN (DTCNN), введенные в работах [14, 19] и ориентированы на решение задач обработки изображений, описываемых с помощью булевых пороговых функций. В работах [17, 18] рассматриваются CNN с дополнительной возможностью реализации неллинейных методов обработки, связанных с вычислением локальных гистограмм (это удобно прежде

всего в плане реализации ранговых и медианных фильтров). Функциональные возможности CNN, по сравнению с классическими CNN и их модификациями [13, 14, 17–19], были существенно расширены с использованием в качестве базовых новых типов нейронов. Алгоритмы, описываемые с помощью непороговых булевых функций, не могут быть реализованы на DTCNN, но их можно реализовать на CNN из универсальных логических элементов (универсальных булевских нейронов) — CNN-UBN, которые были детально рассмотрены в работах [4, 10]. CNN на многозначных нейронах (CNN-MVN) является отличным средством для реализации многозначных нелинейных фильтров (MVF) [5]. MVF эффективны для фильтрации гауссовского, равномерного и даже спекл-шумов, а также для усиления высоких и средних частот (с целью выделения деталей). Для решения последней задачи пока не в полной мере использован и потенциал классических CNN, в частности, не были исследованы возможности применения медианных фильтров для решения задачи коррекции частот. В данной статье мы рассмотрим подробно следующие проблемы: структура и виды CNN, оригинальные алгоритмы точного глобального выделе-

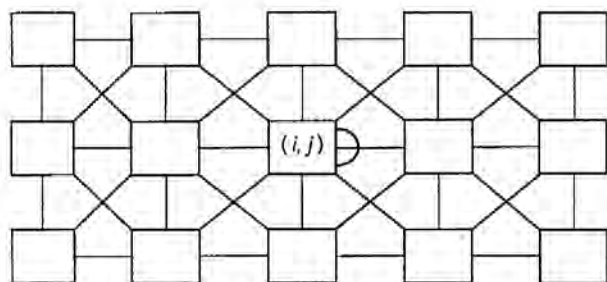


Рис. 1. Фрагмент CNN 3x5 с локальными 3x3 соединениями

ния контуров и выделения контуров по узким направлениям, многозначные нелинейные фильтры, их применение для фильтрации шума и решения задачи коррекции частот (выделения деталей), применение для решения задачи коррекции частот медианного типа фильтров и реализацию всех алгоритмов на CNN.

КЛЕТОЧНЫЕ НЕЙРОСЕТИ

Интенсивное развитие теории нейросетей и их приложений в 1980-е годы коснулось и такой области, как обработка изображений. Подавляющая доля задач фильтрации изображений в пространственной области сводится к однотипным операциям, которые необходимо проделать для обработки каждого отдельного отсчета сигнала. Поскольку всякая нейросеть — это мощный параллельный процессор, то реализация алгоритмов обработки изображений на нейросетях с целью их ускорения возникла закономерно. Наиболее удачным подходом является предложенная в 1988 г. в работе [13] клеточная нейросеть (CNN — cellular neural network). Основное свойство клеточной нейросети состоит в том, что каждый нейрон в ней соединен только с нейронами из своей ближайшей окрестности — на них передает свой выходной сигнал и только с них принимает входные сигналы. Каждый нейрон имеет также и рекурсивное соединение (один из входов соединен с собственным выходом). Рис. 1 иллюстрирует подобную схему соединений на простом примере.

Из схемы соединений, принятой в CNN, очевидно, что она идеально удобна для реализации алгоритмов фильтрации в пространственной области, сводящихся к вычислению линейной свертки с окном. В оригинальной концепции CNN, предложенной в работе [13], динамика каждого нейрона описывается следующим соотношением:

$$v(i, j) = F \left\{ -z(i, j) + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [A(k, l)v(i+k, j+l)] + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [B(k, l)u(i+k, j+l)] + I \right\}, \quad (1)$$

где i, j — номер ij -го нейрона сети, v — выход нейрона, u — вход нейрона, z — состояние нейрона, r — размерность ближайшей окрестности нейрона $r \times r$ (в более поздних работах окрестность может быть и прямоугольной формы), A, B — матрицы $r \times r$, содержащие веса (операторы обратной связи и управляющий соответственно), I — свободный член (порог), F — кусочно-линейная активирующая функция нейрона, определяемая таким образом:

$$F(z) = \frac{|z+1| - |z-1|}{2}. \quad (2)$$

Для реализации фильтров, основанных на подсчетах локальных статистик, в работах [17, 18] была предложена модификация формулы (1) — она дополнена оператором нелинейных операций D :

$$v(i, j) = F \left\{ -z(i, j) + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [A(k, l)v(i+k, j+l)] + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [D(k, l)(u(i+k, j+l) - u(i, j))] + I \right\}. \quad (3)$$

Дискретные во времени CNN (DTCNN) были предложены в работах [14, 19]. Нейроны в такой сети выполняют следующее преобразование исходного сигнала:

$$v(i, j, t) = F_d \left\{ \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [A(k, l)v(i+k, j+l, t-1)] + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r [B(k, l)u(i+k, j+l, t-1)] + I \right\}, \quad (4)$$

где t — отсчеты времени, F_d — активирующая функция нейрона:

$$F_d(z) = \text{sign}(z), \quad (5)$$

а остальные обозначения эквивалентны тем, что используются в формуле (1). Из (5) видно, что DTCNN базируются на пороговых нейроэлементах, что предопределяет ограниченные функциональные возможности таких сетей. Классические CNN, основанные на (1), позволяют реализовать алгоритмы линейной фильтрации в пространственной области, однако CNN с нелинейным оператором (4), позволяя реализовать фильтры медианного типа,

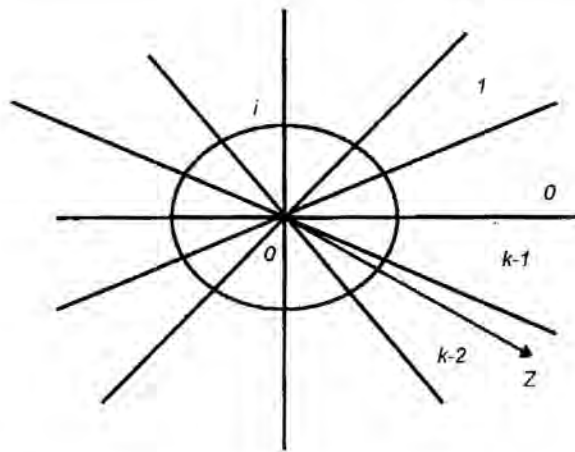


Рис. 2. Активирующая функция многозначного нейрона

не способны реализовать другие алгоритмы нелинейной фильтрации. Необходимо использовать в CNN другие базовые нейроны с целью существенного расширения их функциональных возможностей.

МНОГОЗНАЧНЫЕ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ БУЛЕВСКИЕ НЕЙРОЭЛЕМЕНТЫ

Мы рассмотрим здесь два типа нейронов: универсальный булевский (UBN), реализующий произвольную булеву функцию от n переменных и многозначный нейрон (MVN), реализующий полностью определенные пороговые и частично определенные функции k -значной логики (здесь $k > 0$ в общем случае положительное целое. Заметим, что никаких вычислительных проблем не возникает при $k = 16384$). Итак, основная идея состоит в представлении булевых и k -значных функций от n переменных при помощи $n + 1$ комплекснозначных весов $w_0, w_1, \dots, w_n$:

$$f(x_1, \dots, x_n) = P(w_0 + w_1 x_1 + \dots + w_n x_n), \quad (6)$$

где $x_1, \dots, x_n$ — переменные, P — активирующая функция.

Для многозначного нейрона

$$P(z) = \exp(i2\pi j/k),$$

$$\text{если } 2\pi(j+1)/k > \arg(z) \geq 2\pi j/k; \quad (7a)$$

с целочисленным выходом:

$$P(z) = j, \text{ если } 2\pi(j+1)/k > \arg(z) \geq 2\pi j/k, \quad (7б)$$

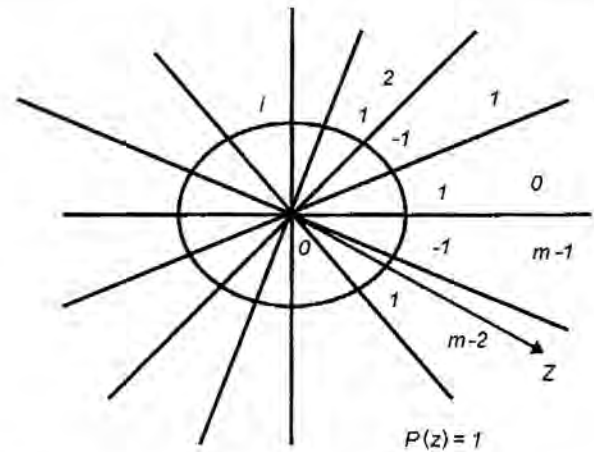


Рис. 3. Активирующая функция универсального булевого нейрона

где $j = 0, 1, \dots, k-1$ — значения k -значной логики, i — мнимая единица, $z = w_0 + w_1 x_1 + \dots + w_n x_n$ — взвешенная сумма, $\arg(z)$ — аргумент комплексного числа z , (значения функции и перемешные кодируются комплексными числами, являющимися корнями k -й степени из единицы: $e^j = \exp(i2\pi j/k)$, $j \in [0, k-1]$, иными словами, значения k -значной логики представляются корнями k -й степени из единицы: $j \rightarrow e^j$). Формулы (7а, б) иллюстрируются рис. 2.

Для универсального булевого нейрона

$$P(z) = (-1)^j,$$

$$\text{если } (2\pi(j+1)/m) > \arg(z) \geq (2\pi j/m), \quad (7в)$$

где m — положительное целое $4n \geq m > 0$, j — неотрицательное целое $0 \leq j \leq m$, $z = w_0 + w_1 x_1 + \dots + w_n x_n$ — взвешенная сумма, $\arg(z)$ — аргумент комплексного числа z . Переменные и функция принимают значения в множестве $\{1, -1\}$. Формула (7в) иллюстрируется рис. 3. Впервые идея подобного представления многозначных функций была предложена в работе [2] и далее развита в работах [6–8, 11]. Ее дальнейшее развитие позволило предложить аналогичный подход для булевых функций [1, 4, 8, 11].

Главные преимущества MVN и UBN по сравнению с другими типами нейронов (Хопфилда, Чуа, многоуровневый персептрон, основанный на свойствах радиально-базисных функций [15], являются: значительно более высокие функциональные возможности и существование быстро сходящихся алгоритмов обучения. Высокие функциональные возможности означают, что на единственно взятом

UBN можно реализовать различные (а не только пороговые) булевы функции любого числа переменных, а для единственного MVN и заданной многозначной функции всегда можно найти такое k , что данная функция будет реализована на одном нейроне.

Алгоритмы обучения, которые мы будем использовать здесь, были недавно рассмотрены в работе [6]. Поэтому мы ограничимся сейчас очень кратким изложением, необходимым для понимания последующих результатов. Очевидно, если взвешенная сумма попадет в «неправильный» сектор на комплексной плоскости (рис. 2, 3), алгоритм обучения состоит в коррекции весов таким образом, чтобы взвешенная сумма попала в один из секторов, соответствующих правильному выходному значению (для UBN), либо в сектор, строго соответствующий ожидаемому выходному значению (для MVN). В работах [2, 7] был предложен алгоритм обучения с корректирующим множителем. Он сводится к следующей процедуре коррекции:

$$W_{m+1} = W_m + \frac{1}{(n+1)} C \omega \varepsilon^q X, \quad (8)$$

где W_m и W_{m+1} — текущий и последующий весовые векторы, X — вектор входных сигналов нейрона (комплексно-сопряженный), ω — коэффициент коррекции, ε — первообразный корень m -й или k -й степени из единицы, C — масштабный коэффициент, q — номер «правильного» (ожидаемого) сектора, ω выбирается из соображений, что взвешенная сумма $z = w_0 + w_1 x_1 + w_n x_n$ должна переместиться как можно ближе к «правильному» сектору (или должна сразу попасть в него) после шага обучения, определяемого (8). Для UBN выбор ω основан на следующем соображении. Если взвешенная сумма попала в «неправильный» сектор, то оба соседних к нему будут «правильными», и двигаться следует именно в тот, к которому текущее значение взвешенной суммы ближе. Для MVN, в случае попадания в неправильный сектор, двигаться нужно в единственно «правильный» сектор номера q . В обоих случаях ε^q соответствует правой границе «правильного» сектора (см. рис. 2, 3). Другой алгоритм обучения, рассмотренный в [4, 11] основан на известном правиле «коррекции ошибки» [15], которое для комплекснозначных нейронов выглядит так:

$$W_{m+1} = W_m + \frac{1}{(n+1)} C (\varepsilon^q - \varepsilon^s) X, \quad (9)$$

где W_m и W_{m+1} — текущий и последующий весовые векторы, X — вектор входных сигналов нейрона (комплексно-сопряженный), ε — первообразный

корень m -й, либо k -й степени из единицы (m и k берутся из (7)), C — масштабный коэффициент, q — номер «правильного» сектора на комплексной плоскости, s — номер неправильного сектора, в который попало текущее значение взвешенной суммы. Для MVN q должно равняться ожидаемому выходному значению. Для UBN q выбирается на каждом шаге из тех же соображений, что в алгоритме (3): если взвешенная сумма попадает в неправильный сектор номер s , ее следует направить в левый ($s+1$), или правый ($s-1$) соседний сектор в зависимости от того, к какому из них текущее значение взвешенной суммы оказалось ближе.

CNN на многозначных и универсальных нейронах (CNN-MVN и CNN-UBN) определяется следующим образом [5, 7]. Используется обычная для CNN схема: каждый нейрон соединен только с нейронами из ближайшей к нему прямоугольной (квадратной) окрестности, предложенная в [13], но с UBN, или MVN в качестве базовых нейронов сети. Каждый нейрон в такой сети реализует соотношение

$$Y_{ij}(t+1) = P[w_0 + \sum_r w_r^{ij} x_r^{ij}(t)], \quad (10)$$

где Y_{ij} — выход нейрона, W_r^{ij} — веса, соответствующие m -му входу ij -го нейрона, X_r^{ij} — m -й вход ij -го нейрона, P — активирующая функция нейрона (7), $\sum_r$ означает суммирование по ближайшей r -окрестности.

МНОГОЗНАЧНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА CNN-MVN

Проблема фильтрации изображения в пространственной области сводится к замене текущего значения яркости B_{ij} в ij -ом пикселе значением $\tilde{B}_{ij}$, которое лучше с некоторой точки зрения. Задача фильтрации шума при обработке космических изображений более чем актуальна. Один спекл-шум на радиолокационных изображениях многого стоит и борьбе с ним посвящено множество работ. В работе [12] приводится один из наиболее полных обзоров по нелинейным методам фильтрации шума, которые гораздо эффективнее линейных (например, весьма популярны фильтры, основанные на вычислении порядковых статистик, но и не только они). В работе [4] предложена концепция многозначной нелинейной фильтрации, основанной на использовании нелинейности активирующей функции MVN.

Пусть $B \in \{0, 1, \dots, 255\}$ — значение яркости.

Рассмотрим множество корней k -й степени из единицы ($k = 256$). Мы можем поставить в соответствие значению яркости B корень из единицы

$$\epsilon^B = \exp(i2\pi B/k) = Y. \quad (11)$$

Таким образом, мы получим взаимно-однозначное отображение $B \leftrightarrow \epsilon^B$.

Двумерный многозначный фильтр (MVF) определяется следующим нелинейным преобразованием:

$$\hat{B}_{ij} = P(w_0 + \sum_{\substack{i-n \leq k \leq i+n \\ j-n \leq l \leq j+n}} w_{kl} Y_{kl}), \quad (12)$$

где P — это функция из (76), Y связан с B соотношением (11), i, j — координаты фильтруемого пиксела, $n \times m$ — апертура фильтра, w_{kl} — коэффициенты фильтра (комплексные в общем случае). Очевидно, что (12) задает класс фильтров, каждый из которых определяется набором весовых коэффициентов w . Следует отметить, что без нелинейной функции P и комплексного сложения (если Y будет также заменен соответствующим B), а также при действительных и неотрицательных весовых коэффициентах (12) сведется к хорошо известной низкочастотной линейной фильтрации в пространственной области. Таким образом, нелинейности, вносимые комплексным сложением и функцией P , принципиальны, очень важны и дают, как будет показано ниже, замечательный эффект. Заметим, что из соотношений (7а, б) и (10)–(12) следует, что двумерные многозначные фильтры могут быть легко реализованы на клеточной нейросети из многозначных нейронов. Специальным случаем MVF является фильтр, также определяемый (12), но одновременно соединяемый с другим нелинейным фильтром, например ранговым. Для такого фильтра в (12) берутся лишь слагаемые под знаком суммы, которые удовлетворяют ранговому критерию.

Проблема реализации MVF на CNN-MVN сводится к нахождению соответствующих наборов весов. Следующий набор очень эффективен для фильтрации шума (отметим, что мы рассмотрим здесь только действительные веса, но оперирующие с сигналами, преобразованными в комплексную форму в соответствии с (11)):

$$W_0 = C; W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & w_{22} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где C — константа (может быть равна нулю), w_{22} — параметр. Чтобы удалить шум, содержащий импульсный компонент, следует рекомендовать $w_{22} =$

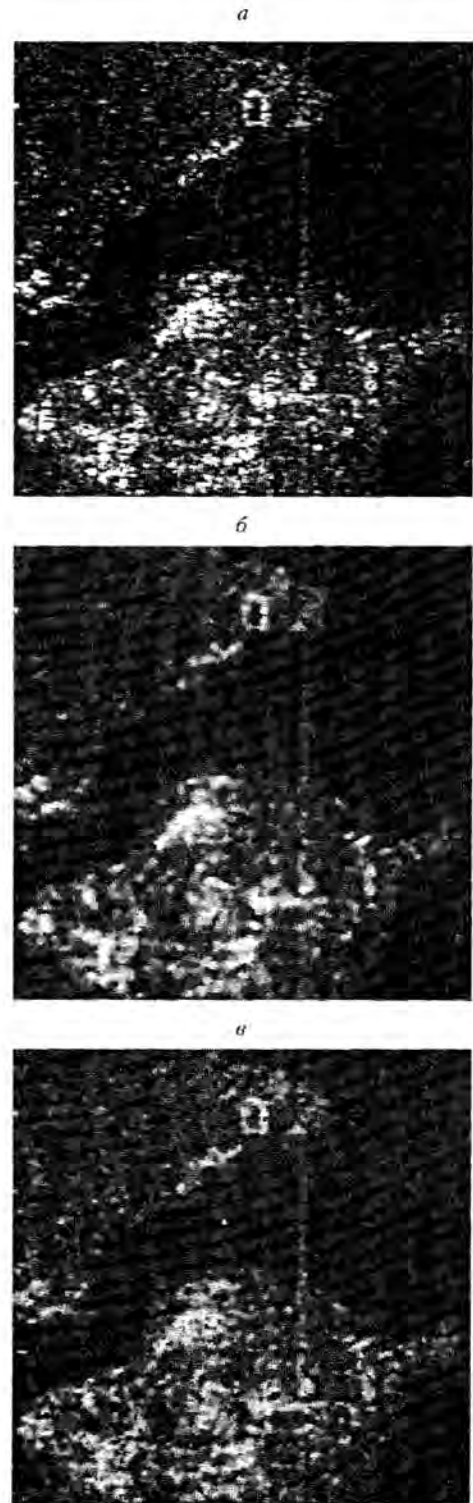


Рис. 4. Многозначная фильтрация: а — исходное радиолокационное спутниковое изображение, искаженное спекл-шумом; б — многозначная фильтрация по набору весов (13), $w_{22} = 1$; в — ранговая фильтрация, апертура 3×3 , окрестность по ближайшим по рангу отсчетам (для сравнения)

= 1. Чтобы фильтровать гауссовский, равномерный либо спекл-шум (возможно в ходе итеративного процесса) наилучший диапазон значений для w_{22} следующий: $1 \leq w_{22} \leq 10$. Большие значения обеспечивают более надежное сохранение несглаженными границ деталей на изображении. Фильтр (12), определяемый набором весов (13), может быть реализован на CNN-MVN с локальным окном 3x3. Набор весов (13) получен из естественных эвристических соображений обеспечения мягкого сглаживания высоких частот. Рассмотрим пример применения MVF для фильтрации шума (рис. 4).

Очевидно, что границы на изображении гораздо лучше сохраняются при помощи MVF, как очевидно и то, что качество фильтрации шума при помощи MVF заметно выше, чем ранговым фильтром, что подтверждается оценкой дисперсии шума (σ) и максимальным отношением сигнал/шум (psn) (см. ниже).

Изображение	σ	psn
Исходное	92.9	28.2
MVF-фильтрация	6.4	52.7
Ранговая фильтрация	32.3	40.4

Мы еще вернемся к многозначным фильтрам при решении задачи выделения деталей.

ВЫДЕЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ПРИ ПОМОЩИ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА CNN

Возможность решения задачи коррекции частот при помощи эффективной аппроксимации соответствующих фильтров в частотной области линейными фильтрами в пространственной области была обоснована в работе [3]. Реализация соответствующих фильтров на CNN исследована в [4, 9]. Коррекция (усиление) частот очень эффективно решает задачу выделения деталей, размеры которых равны апертуре фильтра либо меньше ее на сложном мешающем фоне. Естественно, что описанный эффект очень полезен для обработки космических изображений, характерный недостаток которых — переэкспонированность деталей малых размеров, что особенно проявляется как побочный эффект после фильтрации шума. Следующий линейный фильтр был предложен для решения задачи в [3]:

$$\hat{B}(i, j) = G_1 B(i, j) + G_2 (B(i, j) - B_m) + G_3 B_m + c. \quad (14)$$

Этот фильтр осуществляет коррекцию средних и высоких частот, что ведет к выделению на изображении деталей приблизительно средних размеров. Здесь B_m — локальное среднее по окну, окружаю-

щему пиксел $B(i, j)$; $B(i, j)$ и $\hat{B}(i, j)$ значения яркости (ij) -го пикселя до и после обработки соответственно, G_1, G_2 — коэффициенты, определяющие коррекцию низких частот, G_3 — определяет коррекцию высоких частот, c — константа, влияющая на яркость фона после обработки. Апертюра фильтра (14) должна быть приблизительно равна размерам деталей, которые следует выделить. В работах [4, 9] показано, что фильтр (14) реализуется на классической CNN (описываемой формулами (1) и (2)) следующим весовым оператором:

$$B = \begin{pmatrix} \frac{G_3 - G_2}{nm} & \dots & \dots & \frac{G_3 - G_2}{nm} \\ \vdots & \dots & G_1 + G_2 + \frac{G_3 - G_2}{nm} & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{G_3 - G_2}{nm} & \dots & \dots & \frac{G_3 - G_2}{nm} \end{pmatrix}, \quad A = 0, \quad I = C, \quad (15)$$

где nm — размеры локального окна для CNN, равные апертуре фильтра.

Коррекция высоких и средних частот, определяемая фильтром (14), позволяет достичь хороших результатов при выделении деталей на космических снимках [4], однако линейность этого фильтра предопределяет его недостаток: очень высокая чувствительность к выбору весовых коэффициентов и в силу этого часто либо недостаточное, либо наоборот чрезмерное усиление частот и соответственно резкий сдвиг общего динамического диапазона сигнала ближе к «белому», либо наоборот, «черному» краю, в результате чего какие-то важные детали могут остаться не контрастными. Рассмотрим здесь два нелинейных обобщения фильтра (14), значительно повышающие качество выделения деталей.

Как было показано выше, MVF, определяемые формулами (11) и (12), можно рассматривать как своеобразное обобщение линейных низкочастотных фильтров. Учитывая, что фильтр (14) — линейный, его, естественно, также несложно обобщить на случай MVF. Действительно, из (14), принимая во внимание (11) и (12), получаем следующий фильтр для глобальной коррекции частот:

$$\hat{Y}(i, j) =$$

$$= P \left[c + (G_1 + G_2)Y(i, j) + G_3 - G_2 \sum_{Y(k, l) \in R_{ij}} Y(k, l) \right], \quad (16)$$

и фильтр для коррекции только высоких частот

$$\hat{Y}(i, j) = P \left[c + (1 + G)Y(i, j) - G \sum_{Y(k, l) \in R_{ij}} Y(k, l) \right], \quad (17)$$

где R_{ij} — локальное окно вокруг пиксела $Y(i, j)$; $Y(i, j)$ и $\hat{Y}(i, j)$ — значения яркости в i, j -м пикселе до и после обработки соответственно, коэффициенты G_1, G_3 определяют коррекцию низких частот, G_2 определяет коррекцию высоких частот, G — корректирующий коэффициент, c — константа. Из (16) и (17) легко получить наборы весов для их реализации на CNN-MVN. Фильтр, описываемый соотношением (16), может быть реализован на CNN-MVN с помощью следующего набора весов:

$$W_0 = C; \quad W = \begin{pmatrix} G_3 - G_2 & \dots & \dots & G_3 - G_2 \\ \vdots & \dots & G_1 + G_3 & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ G_3 - G_2 & \dots & \dots & G_3 - G_2 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

Размерность матрицы W в (18) и соответственно апертура фильтра и размер локального окна CNN-MVN равны $n \times m$, что должно соответствовать размерам выделяемых деталей, как и в весовом операторе (15) для фильтра (14). Рекомендуемые значения весовых параметров следующие: $0 \leq G_1, G_3 \leq 1, 5 \leq G_2 \leq 14$. Фильтр, описанный соотношением (17), может быть реализован таким набором весов размерности (3×3) ((3×3) — наиболее эффективная апертура для данного фильтра):

$$W_0 = C; \quad W = \begin{pmatrix} -0.5 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & w_{22} & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где C — константа (может быть равна нулю), w_{22} — параметр. Рекомендуемые значения — $6 \leq w_{22} \leq 14$; значение $w_{22} = 6$ соответствует более жесткому, а $w_{22} = 14$ — более мягкому усилению высоких частот (более резкому и более мягкому выделению мелких деталей на изображении). Фильтры (16) и (17) нелинейны и гораздо менее чувствительны к выбору весовых коэффициентов, чем у линейный фильтр (14). Их нелинейность позволяет при необходимости добиться более существенного уси-

ния высоких частот и более качественного выделения мелких деталей (по сравнению с тем же линейным фильтром (14)).

Еще одним нелинейным обобщением фильтра (14), которое мы предлагаем в данной работе, является медианная коррекция частот. Замена в (14) локального среднего по окну медианой по тому же локальному окну, приводит к следующим фильтрам, осуществляющим медианную коррекцию частот:

$$\hat{B}(i, j) = G_1 B(i, j) + G_2 (B(i, j) - B_{med}) + G_3 B_{med} + c, \quad (20)$$

$$\hat{B}_{ij} = B_{ij} + G (B_{ij} - B_{med}) + c. \quad (21)$$

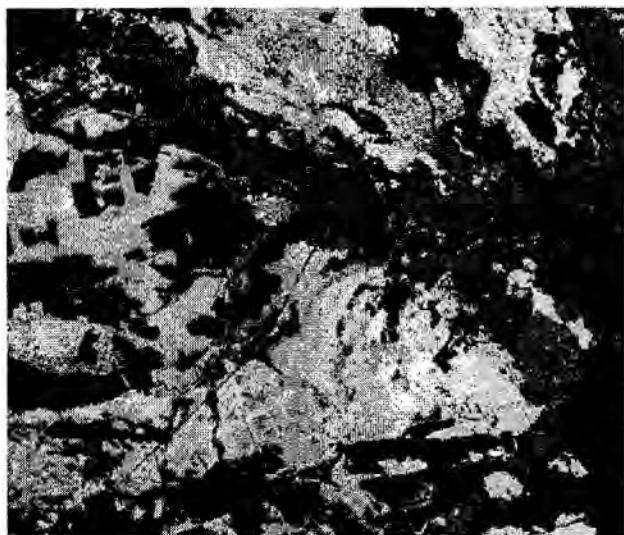
Фильтр (20) определяет глобальную коррекцию частот, позволяющую выделить детали размеров, соответствующих апертуре фильтра, а фильтр (21) определяет коррекцию высоких частот, позволяющую выделить наиболее мелкие детали. Здесь B_{med} — медиана по локальному окну, окружающему пиксел $B(i, j)$; $B(i, j)$ и $\hat{B}(i, j)$ значения яркости ij -го пиксела до и после обработки соответственно, G_1, G_3 — коэффициенты, определяющие коррекцию низких частот, G_2, G определяют коррекцию высоких частот, c — константа, влияющая на яркость фона после обработки. И вновь нелинейность фильтров (20) и (21) освобождает их от чувствительности к небольшим изменениям весовых коэффициентов и позволяет при необходимости значительно резче и качественнее выделить детали, чем при использовании фильтра (14). Фильтры (20) и (21) могут быть реализованы на CNN посредством модели (3) с нелинейным оператором D аналогично тому, как реализуются медианные фильтры в работах [17, 18].

Главная отличительная черта фильтров (16), (17) и (20), (21) (по сравнению с линейным фильтром (14)) является сохранение общего динамического диапазона наряду с управляемым (от мягкого до сильного) усилением локальных контрастов. Преимущества коррекции частот при помощи MVF и медианной коррекции иллюстрируются на рис. 5.

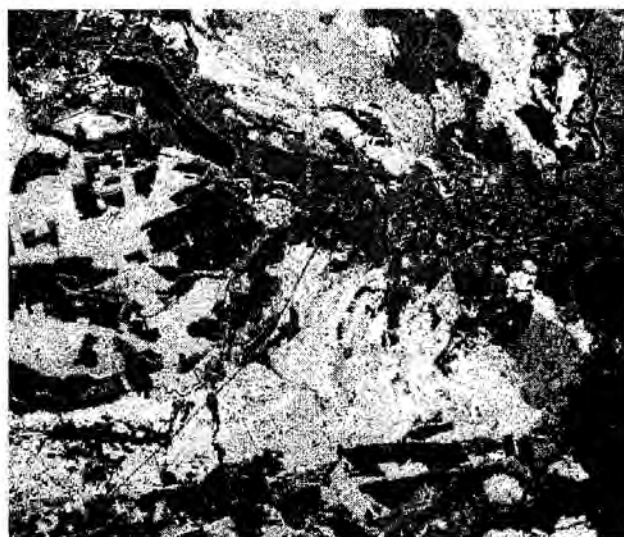
ТОЧНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ, ОПИСЫВАЕМОЕ НЕПороГОВЫМИ БУЛЕВЫМИ ФУНКЦИЯМИ И ЕГО CNN-UBN РЕАЛИЗАЦИЯ

В работах [4, 10] были рассмотрены алгоритмы выделения контуров и фильтрации импульсных помех, а также их реализация на CNN-UBN. Здесь хотелось бы развить идеи, представленные в ука-

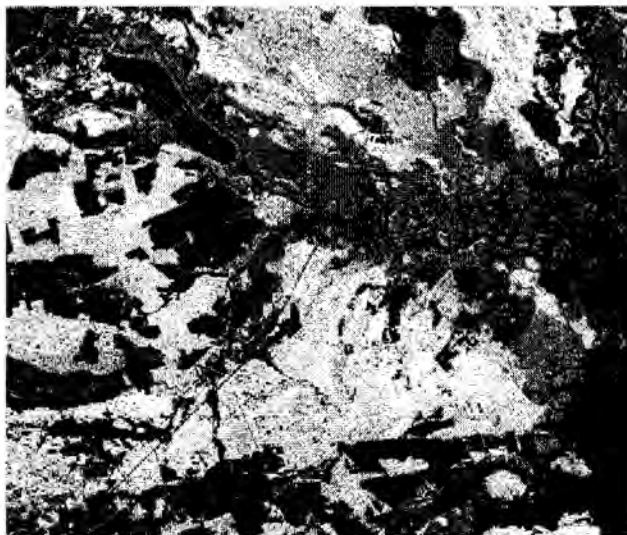
а



а



б



з

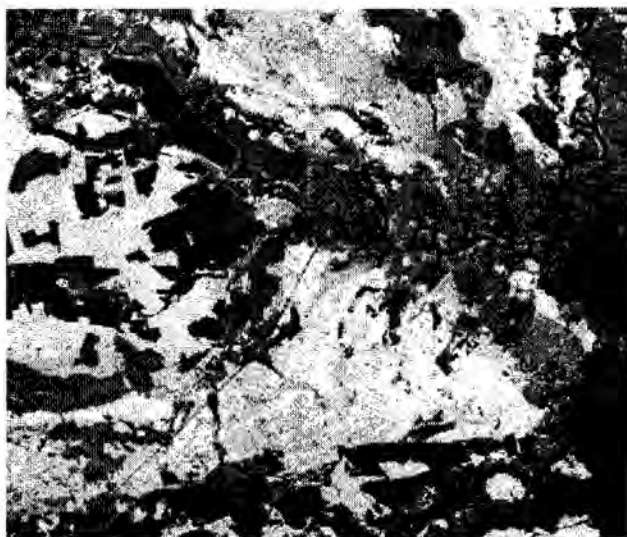


Рис. 5. Коррекция частот (выделение деталей): а — оригинал; б — коррекция при помощи MVF (фильтр (17), набор весов (19), $w_{22} = 8.0$); а — коррекция при помощи медианного типа фильтра (21) ($G = 2.5$); з — коррекция при помощи линейного фильтра (10) ($G = 2.5$). Более четкое и контрастное выделение деталей нелинейными алгоритмами очевидно. Снимок а является конечным продуктом обработки НАСА. Он был любезно предоставлен автору для экспериментов Центром аэрокосмических исследований Земли НАН Украины

зашных работах. Основная идея предложенного подхода к точному выделению контуров состоит в том, что обработка полутонового изображения производится путем раздельной обработки битовых плоскостей и их последующего объединения в результирующее полутоновое изображение. Обработка же битовой плоскости описывается булевой функцией, определяющей, есть ли контур в центре локального окна 3×3 , или нет. В отличие от классических подходов к решению этой задачи (операторы Лапласа, Собела, Превитт, а также операторы, основанные на применении ранговых алгорит-

мов [12, 16]) предложенный подход является гораздо более эффективным, поскольку заведомо обеспечивает абсолютно точное выделение контуров, соответствующих любым, даже минимальным (равным 1) перепадам яркости, в то время как все перечисленные классические алгоритмы усиливают сильные перепады, но часто «не замечают» слабые. Предлагаемый же подход в принципе объективен, поскольку основан на точном описании всех перепадов яркости. В работах [4, 10] для выделения контуров строится булева пороговая функция, определяемая соотношением (22а)

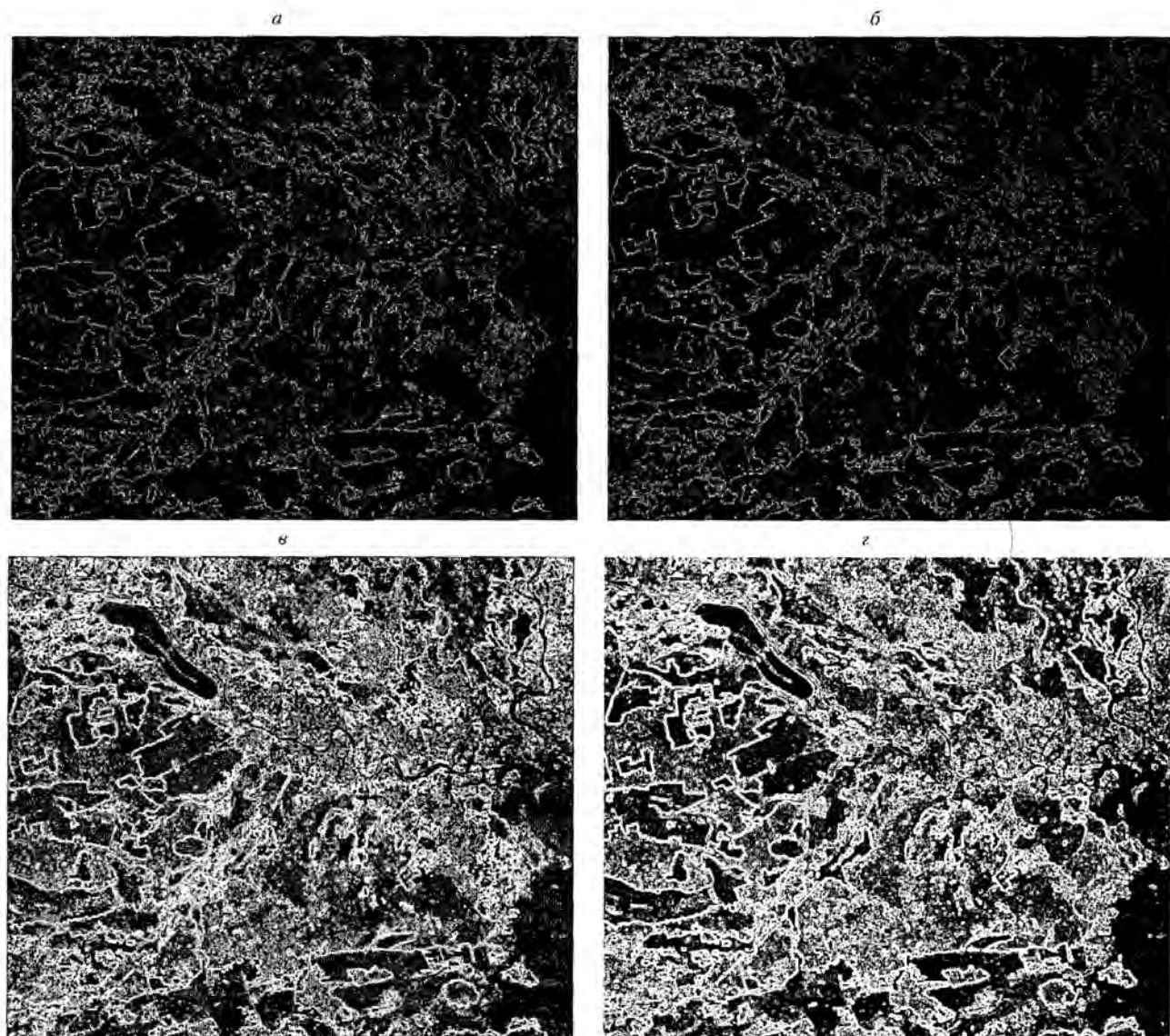


Рис. 6. Выделение контуров: *а* — обработка по функции (22а); *б* — обработка по функции (23а); *в* — результат глобальной эквализации гистограммы изображения *а*; *г* — оператор Собела

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= x_5 \& (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8 \vee \bar{x}_9); \quad (22a)$$

$$W = (6.0, 17.0); \begin{bmatrix} (-3.23, 3.64) & (-7.83, -0.02) & (-2.50, -0.13) \\ (-6.94, 3.34) & (35.06, 0.66) & (-6.50, 2.13) \\ (-1.83, 0.02) & (-7.23, -3.64) & (-1.00, 1.00) \end{bmatrix}. \quad (226)$$

Фактически функция (22а) описывает процедуру выделения «восходящих» перепадов яркости и соответствующих им контуров. Алгоритм обучения (8), примененный к этой функции ($m = 4$ в (7в)), дает набор весов (22б) для реализации функции на CNN-UBN. Естественной является, однако, постановка вопроса о выделении контуров, соответствующих «нисходящим» перепадам яркости, глобального выделения контуров, а также выделения контуров по отдельным узким направлениям.

Булева непороговая функция (23а) выделяет на бинарном изображении «нисходящие» перепады яркостей и соответствующие им контуры

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= \bar{x}_3 \& (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_6 \vee x_7 \vee x_8 \vee x_9); \quad (23a)$$

$$W = (-1.7, -1.5) \times$$

$$\times \begin{bmatrix} (-0.91, 0.74) & (-0.78, -0.99) & (-0.1, -0.04) \\ (-0.06, -0.08) & (1.4, 1.6) & (-0.86, -0.96) \\ (-0.15, -0.07) & (-0.06, -0.05) & (-0.142, -0.03) \end{bmatrix}. \quad (236)$$

Алгоритм обучения (8), примененный к этой функции ($m = 4$ в (7в)) дает набор весов (236) для реализации функции на CNN-UBN. На рис. 6, а представлен результат выделения контуров при помощи функций (22) и (23) на изображении, полученном путем многозначной коррекции частот (рис. 5, б), и для сравнения приводится результат выделения контуров на том же исходном изображении при помощи оператора Собела. Дизъюнкция функций (22а) и (23а), также являющаяся непороговой функцией, позволяет осуществить глобальное выделение контуров на изображении:

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= x_5 \& (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8 \vee \bar{x}_9) \vee \\ \vee \bar{x}_5 \& (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_6 \vee x_7 \vee x_8 \vee x_9). \quad (24)$$

Однако, с нашей точки зрения, отдельное выделение контуров, соответствующих нисходящим и восходящим перепадам яркостей, предпочтительнее, поскольку функция (24), хотя и эффективнее классических операторов, но имеет один из их недостатков. Выделяя контур дважды на многих пикселах (за счет выделения как восходящих, так и нисходящих перепадов), она резко усиливает значительные перепады яркостей по сравнению с незначительными, но не менее важными.

Большой интерес представляет задача выделения контуров по узким направлениям. До сих пор для решения этой задачи применялись, как правило, маски Превитта [16]. Однако им присущи те же недостатки, что и классическим операторам выделения контуров, еще больше проявляющиеся при не-

обходимости выделения контуров по строго узким направлениям. Мы предлагаем решать эту задачу вновь путем раздельной обработки битовых плоскостей изображения при помощи непороговых булевых функций, позволяющих выделить контуры, соответствующие строго заданному направлению. Задача может быть решена следующим набором булевых функций (мы рассмотрим только функции, выделяющие контуры, соответствующие восходящим перепадам яркостей, функции для выделения нисходящих и глобальных перепадов легко могут быть получены из рассматриваемых аналогично тому, как получены функции (23а) и (24) на основе функции (22а)).

Направление север $\rightarrow$ юг

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= (x_5 \& x_2) \& (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3) \vee (x_5 \& x_8) (\bar{x}_7 \vee \bar{x}_9). \quad (25)$$

Направление запад $\rightarrow$ восток

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= (x_5 \& x_4) \& (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_7) \vee (x_5 \& x_6) (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_9). \quad (26)$$

Направление юго-запад $\rightarrow$ северо-восток

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= (x_5 \& x_7) \& (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_8) \vee (x_5 \& x_3) (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_6). \quad (27)$$

Направление северо-запад $\rightarrow$ юго-восток

$$Y \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{bmatrix} =$$

$$= (x_5 \& x_4) \& (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_7) \vee (x_5 \& x_6) (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_9). \quad (28)$$

Функции (25) – (28), как и (22) – (24), непороговые, но легко могут быть реализованы на UBN при помощи алгоритмов обучения (8) и (9), следовательно, и обработка может быть эффективно реализована на CNN-UBN. На рис. 7 показан пример выделения контуров на фрагменте спутникового изображения морской поверхности. Выделение контуров по направлениям позволяет определить

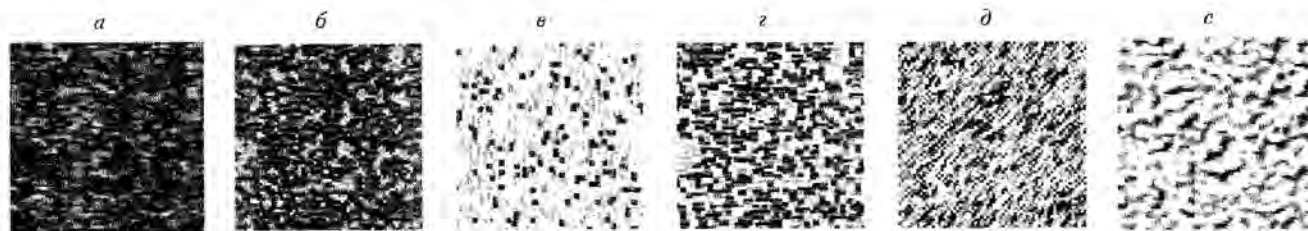


Рис. 7. Выделение контуров в изображениях морской поверхности: *а* — исходный фрагмент; *б* — глобальное выделение контуров по восходящим перепадам (функция (22а)); *в* — выделение контуров в направлении север → юг; *г* — выделение контуров в направлении запад → восток; *д* — выделение контуров в направлении юго-запад → северо-восток; *е* — выделение контуров в направлении северо-запад → юго-восток

направления и интенсивность подводных течений. Очевидно, что в направлении север → юг, например, течение практически отсутствует.

Автор признателен чл.-корр. НАН Украины В. В. Грицику за внимание к работе, а также Н. Н. Айзенбергу, Г. А. Кривошееву, Т. П. Беликовой — соавторам по предыдущим работам, послужившим фундаментом для данной работы.

1. Айзенберг И. Н. Универсальный логический элемент над полем комплексных чисел // Кибернетика. — 1991. — № 3. — С. 116 — 121.
2. Айзенберг Н. Н., Иваськин Ю. Л. Многозначная пороговая логика. — Киев: Наук. думка, 1977.
3. Беликова Т. П. Моделирование линейных фильтров в задачах медицинской диагностики // Цифровые методы обработки изображений и полей в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1990. — С. 130 — 152.
4. Aizenberg I. N. Processing of noisy and small-detailed gray-scale images using cellular neural networks // J. Electron. Imaging. — 1997. — 6, N 3. — P. 265 — 280.
5. Aizenberg I. N. Multi-valued non-linear filters and their implementation on cellular neural networks // Frontiers in artificial intelligence and applications. Vol. 41. Advances in Intelligent Systems / Ed. F. C. Morabito. — Amsterdam — Berlin — Oxford — Tokyo — Washington DC: IOS Press, 1997. — P. 135 — 140.
6. Aizenberg I. N., Aizenberg N. N. Universal binary and multi-valued neurons paradigm: conception, learning, applications // Lect. Notes Comput. Sci. / Eds J. Mira, R. Moreno-Diaz, J. Cabestany. — 1997. — 1240. — P. 463 — 472.
7. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. CNN Based on Multi-Valued Neuron as a Model of Associative Memory for Gray-Scale Images / Proc. of the Second IEEE Internat. Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications. — Technical University Munich, Germany. — October 14 — 16, 1992. — P. 36 — 41.
8. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. Fast converged learning algorithms for multi-level and universal binary neurons and solving of the some image processing problems // Lect. Notes Comput. Sci. / Eds J. Mira, J. Cabestany. — 1993. — 686. — P. 230 — 236.
9. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N. CNN-like networks based on multi-valued and universal binary neurons: learning and application to image processing // Proc. of the Third IEEE Internat. Workshop on Cellular Neural Networks and their applications. — Rome, 1994. — P. 153 — 158.
10. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N., Belikova T. P. Extraction and localization of important features on gray-scale images: implementation on the CNN // Proc. of the Third IEEE Internat. Workshop on Cellular Neural Networks and their applications (CNNA-94). — Rome, 1994. — P. 207 — 212.
11. Aizenberg N. N., Aizenberg I. N., Krivosheev G. A. Multi-valued neurons: learning, networks, application to image recognition and extrapolation of temporal series / Lect. Notes Comput. Sci. / Eds J. Mira, F. Sandoval. — 1995. — 930. — P. 389 — 395.
12. Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of non-linear digital filtering. — New-York: CRC Press, 1997.
13. Chua and Yang L. Cellular neural networks: Theory // IEEE Trans. Circuits and Syst. — 1988. — 35. — P. 1257 — 1290.
14. Harrer H., Nossek J. A. Discrete-time cellular neural networks // Int. J. Circuit Theory and Applications. — 1992. — 20. — P. 453 — 467.
15. Haykin S. Neural networks. A comprehensive foundation. — New York: Macmillan College Publ. Comp., 1994.
16. Pratt W. K. Digital Image Processing. — New York: John Wiley & Sons, 1978.
17. Rekeczky, Roska T. and Ushida A. CNN Based Self-Adjusting Nonlinear Filters // Proc. of the Fourth IEEE Internat. Workshop on Cellular Neural Networks and their applications. — Seville, 1996. — P. 309 — 314.
18. Shi B. E. Order-statistic filtering with cellular neural networks // Proc. of the Third IEEE Internat. Workshop on Cellular Neural Networks and their applications. — Rome, 1994. — P. 441 — 444.
19. Tan S., Hao J., Vandewalle J. Cellular neural networks as a model of associative memories // Proc. of the 1990 IEEE Internat. Workshop on CNN and their applications (CNNA-90). — Budapest, 1990. — P. 23 — 26.

EFFICIENT ALGORITHMS FOR SPACE IMAGE PROCESSING AND THEIR REALIZATION IN CELLULAR NEURAL NETWORKS

I. N. Aizenberg

Classical cellular neural networks as well as cellular networks of multiple-valued and universal neural elements are considered. A number of original linear filters, their use in noise filtering and frequency correction are described. Algorithms for global precise contour allocation and contour allocation in narrow directions are also discussed. All algorithms are realized in cellular neural networks and illustrated by examples of space image processing.

УДК 550.38: 519.21

Методика побудови підсистем візуалізації космічної інформації

Я. П. Драган, Б. І. Яворський

Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль

Надійшла до редакції 24.03.98

Запропоновано постулати системного забезпечення експерименту, зокрема при розробці підсистем візуалізації. Задля витримання умов реального масштабу часу експерименту (забезпечення пропускну здатності інформаційного каналу людина-техніка при мінімальній втраті інформації) вимагаємо від вигляду представлення фінітності та інваріантності до трансляції в часі. По супутникових каналах зв'язку тривалий сигнал оператор спостерігає короткий інтервал часу (реалізацію сигналу). Спостереження можна трактувати як набір реалізацій (множину), або ансамбль (коли на множині реалізацій задається ще й випадкова міра). З постульованих умов зауважено, що для розробки технічних засобів варто застосовувати теоретичну модель, що будується на основі енергетичної концепції теорії сигналів. Вона охоплює детерміновані, випадкові стаціонарні та періодично не-стаціонарні сигнали, властиві біо-, гео-, теліо-, екоявищам. Крім того, модель враховує кінцевість енергетичного ресурсу фізичного джерела сигналу та закон збереження енергії.

ВСТУП

Моніторинг та вивчення Землі з космосу і навколоземного космічного простору є ефективними у вигляді активного експерименту з участю дослідника, який оперативно керує його ходом експерименту. Така схема експерименту є компромісною з огляду на співвідношення між зайнятістю людини і технічних засобів у складній системі поряд з повністю автоматичними чи «ручними» системами. Співвідношення ресурсів людини і техніки в системі можна оптимізувати за складним критерієм, що враховує вартість, споживану енергію, габарити, швидкість, точність і т. п., при її функціонуванні в необхідних режимах. Технічні системи з участю людини називають ергатичними (за пропозицією D. Aggio, I конгрес ІФАК). У випадку функціонування такої системи у відриві від бази енергетичних ресурсів її називають ергаматом, а якщо вона здатна самостійно відтворювати себе або хоч би добувати енергетичні ресурси — ерганізмом.

В даній роботі описано методику побудови наземної підсистеми візуалізації характеристик сигналу, що надходить з космічних технічних засобів (ШСЗ) про об'єкт дослідження, для ергатичної системи активного експерименту. За виглядом цих характеристик оператор вирішує про подальший хід експерименту (від елементарного рішення про необхідність їх вибору, реєстрації і супроводу допоміжними даними до складніших рішень про зміну орієнтації супутника, його орбіти, тощо). Розробку подібних підсистем не формалізовано, тому вона ще й на сьогодні є неефективною, провадиться навіть в ході космічного експерименту. Ця робота відноситься до робіт, пов'язаних зі створенням мережі опрацювання інформації, актуальних за концепцією АКПУ [3, 4].

Модель сигналу. У роботі [7] при викладі основних ідей енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС) та тих можливостей, що вона відкриває для побудови засобів аналізу сигналів підкреслено, що теорія сигналів активно формується на

наших очах і нашими руками як напрямок статистичної радіофізики. Остання охоплює якнайширше коло колиливих та хвильових явищ у найрізноманітніших за природою об'єктах та системах, в тому числі з урахуванням впливів геофізичних та космічних факторів — проблеми гідроаерокосмосу, сонячно-земних зв'язків, Світового океану, біоритмології, синергетики.

Актуальні проблеми підвищення ефективності досліджень та використання тріади «модель—алгоритм—програмна реалізація» системи опрацювання та аналізу сигналів, які є засобами перенесення у просторі чи часі відомостей про стан фізичної системи [11]. Природно вважати сигнал результатом вимірювання певної характеристики фізичної системи, тобто результатом реєстрації фізичної величини, що є на виході первинного перетворювача (давача).

При цьому конкретний вигляд використовуваної моделі сигналу є вирішальним, бо модель має втілювати у математичній конструктивній формі суттєві ознаки досліджуваного об'єкта. Всякий, хто має справу з вивченням спостережливих ознак фізичних систем, стикається з проблемами вибору з існуючих чи створення нових засобів для зображення, а фактично — обґрунтування адекватної математичної моделі і класифікації сигналів [12]. При розгляді сигналів як сутностей у собі в тій чи іншій мірі окремо від системи, що продукує їх, стають перед неосяжним розмаїттям можливостей зображення та класифікації [13]. Придатність різних методів залежить від того, як дослідник має намір використати дані, що їх несуть сигнали. Узагальнене та уніфіковане трактування їх забезпечується математичними концепціями, втіленими у суті моделі як об'єкти найсучасніших здобутків математики, а головне — модерних розділів функціонального аналізу.

Щоб модель відповідала об'єктові, необхідно його досліджувати емпірично доти, доки, за словами Леонардо да Вінчі, не витягнемо з дослідів загальних законів, бо тільки досвід відкриває нам загальні закони.

Логічний аналіз результатів досліджень природних об'єктів, особливо після праць Р. Фішера з вивчення у 1920-ті р. рілльничих ґрунтів, зумовив явне усвідомлення існування складних систем, підданих переплетенням впливів багатьох факторів, ролі сигналів у них як носіїв інформаційної взаємодії. Це привело до зміни всієї парадигми — замість детерміністичних описів за допомогою диференціальних рівнянь виник новий напрямок досліджень — *data analysis* з гаслом: «для кожного наявного набору даних шукайте таку схему (систему

припущень), яка найліпше відповідає як цьому наборові, так і всьому, що нам відомо про нього» [2].

Підсумовуючи досвід багатьох дослідників процесів у складних системах типу розглянутих в рамках проблем гідроаерокосмосу, сформулюємо такі постулати щодо моделей сигналів у них: 1) *фінітність* (скінченність) самої множини даних чи певних їхніх характеристик чи характеристик їхніх відображень у певні простори об'єктів іншої природи; 2) *інваріантність* у часі названих чи інших ознак; 3) *консервативність*, тобто справедливість законів збереження інваріантів при відображеннях (як енергії чи потужності); 4) *конструктивність*, тобто можливість обґрунтованості ізоморфних відображень в інші простори чи синтетичних зображень за допомогою асимптотичних виразів у вигляді рядів.

Перші два з цих постулатів мають забезпечувати стиск даних, а решта є вимогами до можливої структури моделі. Вони мають відкрити можливість побудови моделі у вигляді коректно означеного математичного об'єкта як бази розробки чи шляхом модифікації вже відомого математичного числення, чи створенням нового. Це завжди є засобом формалізації та автоматизації логічних умовиводів як у теоретичному аналізі перетворень сигналів, так і при інженерному проектуванні систем для реалізації потрібних перетворень. Модель тут явно виступає як носій суттєвих для розв'язування даного класу задач ознак сигналів, як заміник сигналу. Теоретичний аналіз має справу з математичними об'єктами, а математичний об'єкт задається винятково тільки аксіомами. Тут постає дві проблеми: 1) проблема існування в математичному сенсі означуваного цими аксіомами об'єкта, тобто несуперечливості (взаємної логічної) і повноти їх, та 2) проблема обґрунтування розумності таких аксіом, при тому, що в розпорядженні є тільки фізично виправдані постулати.

Вже в 1930-ті роки стала зрозумілою недостатність позитивістської концепції будувати теорію на строго вимірюваних фізичних величинах. У відомому листі до К. Поппера А. Ейнштейн (див. [15]) підкреслював, що «теорія не може бути вироблена з результатів спостережень, але вона може бути тільки вигадана». А пізніше він наголошував, що «теорія визначає, що і як можна спостерігати». Це фактично означає не тільки планування експерименту, а й інженерну роботу з його технічного забезпечення.

Отже, побудова моделі, узгодження її з постулатами для формулювання на підставі цих аксіом як компромісу постулатів і логічних вимог до аксіом є творчим актом. Він не може бути формалізований

— формалізація не є формальним процесом. Допомагає тут відома концепція побудови ідеальних, втім числі математичних об'єктів абстрагування, тобто відкидання неістотних ознак. Але тут необхідно підкреслити, що є й інша тенденція — не тільки збіднювання ознак абстрагуванням, але й збагачення додаванням до отриманих із спостережень ознак нових — додуманих, вигаданих з метою забезпечення повноти аксіом, тобто надання їм здатності означити модель як коректний математичний об'єкт. На цю обставину вперше явно вказав відомий фінський математик Р. Невалінна: «звичайно однобічно підкреслюють абстрагування, а про доповняльну тенденцію, суттєву для процесу ідеалізації майже нічого не говориться. Між тим власне останній момент падає поняттям та ідеям їхню справжню «продуктивну силу» і рухає мислення» [6]. Таке доповнення постулатів у сенсі Невалінни і дає обґрунтування застосовності відповідних засобів математики: понять, символіки, числень для побудови і дослідження моделей сигналів. Виведені з аксіом, що означають модель, теореми (вся їхня сукупність) і становить теорію конкретного виду сигналів у даному разі.

Зі сказаного має бути зрозумілим, що фізичні експерименти дають результати для формулювання постулатів, вони, доповнені в сенсі Невалінни до аксіом, задають відповідний цим постулатам математичний об'єкт — модель, вивчення якого ведеться винятково строгими математичними методами, сумісними з цим об'єктом.

З іншого боку, модель хоч і математична, але є об'єктом двоїстої природи, бо, крім формально-математичних ознак, має втілювати у своїй структурі ознаки досліджуваного об'єкта, суттєві для того, щоб модель та індуковане нею числення стали засобом ефективного розв'язання певного класу задач. І чим більше висновків з постулатів (фактів теорії) можна отримати, тим адекватнішою є модель.

Модель об'єкта — підсумок знань про нього та основа для нових досліджень. Постулати подібні до поезії, оскільки, за словами А. Ренї (див. [8]), виражаються звичайною мовою, але мають дивовижно багатий зміст, що ніби суперечить теорії інформації. Ключ до розгадки цього парадоксу є своєрідний резонанс, бо «письменник не тільки повідомляє нам інформацію, але й грає на струнах мови з такою майстерністю, що наш розум і навіть сама підсвідомість резонують». На ролі підсвідомості у творчості наголошували І. Франко [9] та Ж. Адамар [11]. Потреба такого резонансу є ствердженням «творчої невизначеності» — кожен дослідник по-своєму може резонувати на вираженні

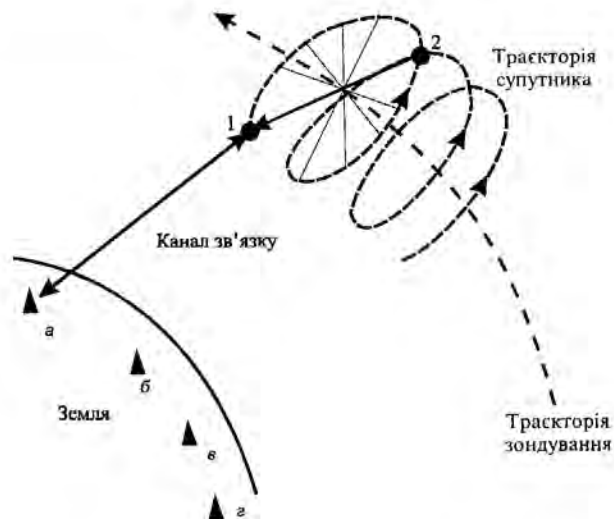


Рис. 1. Схема активного експерименту в космосі: 1 — активний супутник, 2 — пасивний, а, б, в, г — наземні станції спостереження

постулатами ознаки і по-різному втілювати їх у модель. Цим визначиться не стільки адекватність, скільки «потужність» моделі і широта задач, які з її використанням можна ефективно розв'язувати.

Коли глянемо тепер на сформульовані раніше постулати та пригадаємо вживані у класичній математиці та детерміністичних теоріях розклади, то побачимо, що доцільно розрізняти сигнали (та їх зображення), для яких область задання є: 1) скінченний відрізок, 2) вся числова вісь R і скінченною є норма, яка описує енергетичні ознаки: 1) повна енергія, 2) середня потужність (вона охоплює і задані на всій осі сигнали зі сталою миттєвою потужністю). Норма є квадратною функцією, що дає змогу використати найбагатший розділ сучасного функціонального аналізу — апарат різних версій функційних просторів. Але стосовно випадкових процесів як так званих абстрактних функцій (як їх розуміють з часів С. Бохнера), коли вони задані на осі R чи її відрізку $D \subseteq R$, а в разі дискретного часу — на відповідній множині цілих чисел, і коли значеннями їх є елементи колмогоровського гільбертового простору K центрованих випадкових величин скінченної дисперсії. А ймовірності стають панівною мовою сучасної науки [14].

З урахуванням цього була сформована аксіоматика енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС) [7]: 1) простір-час має евклідову структуру; 2) енергетичні характеристики служать нормами у просторі сигналів як абстрактних функцій; 3) критерієм класифікації сигналів є скінченність їхніх норм.

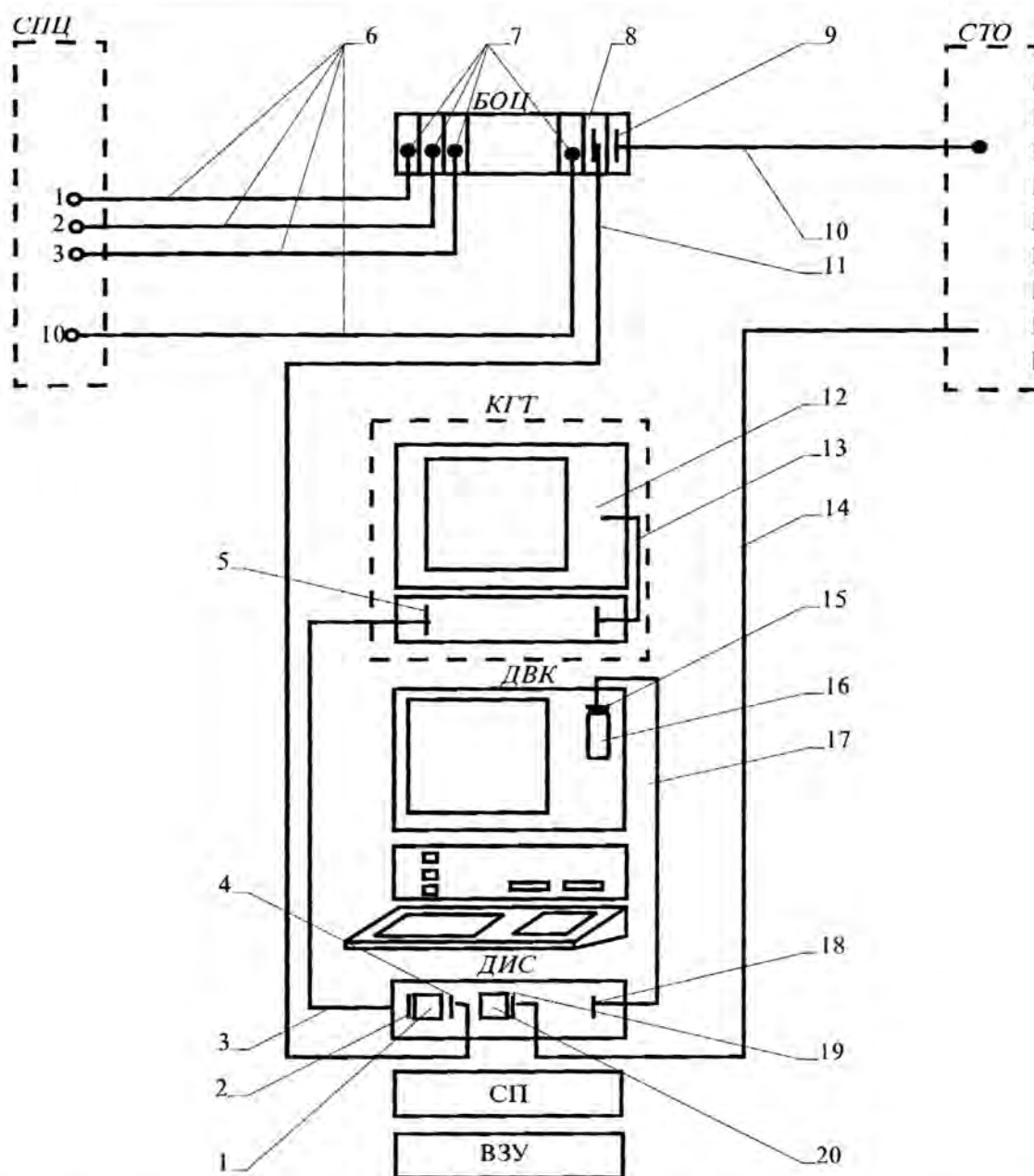


Рис. 2. Блок-схема підсистеми оперативної обробки та візуалізації телеметричної інформації. СПП — система прийому даних, БОЦ — блок оцифровки, СТО — система подальшої телеобробки, КГТ — кольоровий графічний термінал, ДВК — діалого-обчислювальний комплекс, ДИС — дисководи, СП — спецпроцесори, ВЗУ — зовнішній запам'ятовуючий пристрій)

Звідси випливають висновки: 1. Поділ на класи є альтернативним для процесів на осі, збігаються вони для сигналів на циклічній групі (на відрітку, трактованому як коло). 2. Простір сигналів має гільбертову структуру. 3. Моделями сигналів є випадкові процеси — елементи функційних гільбертових L^2 -просторів (для класу ϵ процесів скінченної повної енергії) чи відповідно B^2 -просторів (для

класу π процесів скінченної середньої потужності) — над гільбертовим часовим простором K . 4. Координатні функції зображень сигналів є базисами у позитивному просторі побудованого за ядрними операторами, ядром якого є коваріація процесу, оснащення. 5. Зображення процесу як елемента гільбертового простору над простором K рівносильне зображенню коваріації як ядра ядерного оператора

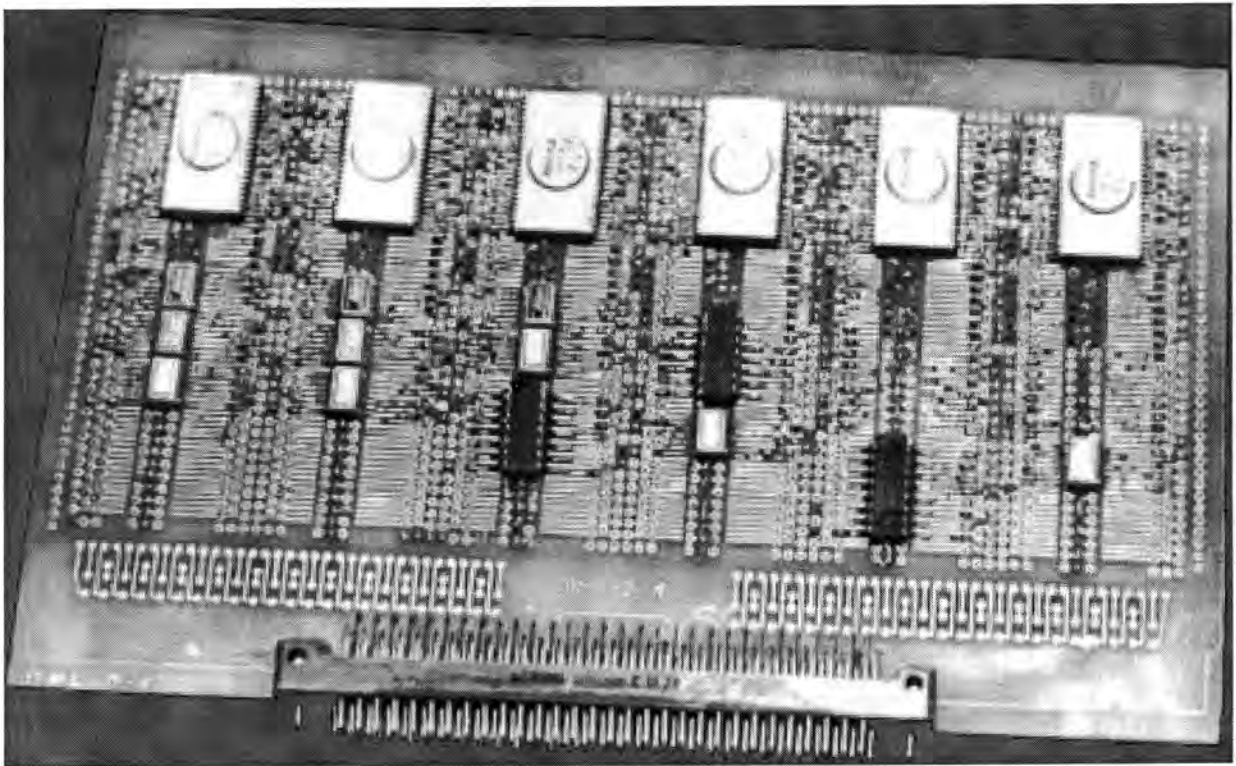


Рис. 3. Спеціалізований процесор

– звичайної функції двох змінних, яка для процесів класів ϵ та π належить відповідно до просторів $L^2(D^2)$ чи $B^2(R^2)$. 6. Можливі чотири типи розкладів, залежно від того, чи ортогональні координатні функції та чи корельовані коефіцієнти. 7. Збіжність розкладів за енергетичною метрикою загальніша за відомі – рівномірну (в просторі K) та абсолютну [5, 7].

ЕТСС охоплює відомі методи аналізу сигналів. Метод канонічного зображення Пугачова та метод гільбертового простору з відтвірним ядром в разі спектральних зображень дає змогу означити класи варіантності процесів з комутативними кореляційними операторами, а з використанням відповідних координатним функціям операторів узагальненого зсуву – розвинути для них аналіз у часовій області за допомогою означуваних цими операторами згорткових алгебр, а також в разі ортогональних зображень, зокрема для розкладів, що мають швидкі алгоритми. ЕТСС дає засоби аналізу і так званих локально стаціонарних процесів – моделей еволюційних змін, а також моделей ритміки – періодично корельованих та споріднених з ними майже і поліперіодично корельованих випадкових процесів.

ЕТСС, будучи доповненням і завершенням коре-

ляційно-спектрального аналізу, дає засоби розв'язання багатьох проблем дослідження сигналів і конструювання технічних засобів, в тому числі класифікації сигналів та обґрунтування, а тому і специфікації алгоритмів опрацювання емпіричних даних про досліджувані об'єкти та втілення їх у відповідні технічні засоби згідно зі згадуваною вже тезою – теорія визначає, що і як можна спостерігати [15]. Для реалізації такої ідеології розроблена і виготовлена відповідна апаратура.

Апаратура. Експеримент полягає у вивченні просторової структури магнітного поля шляхом інжекції частинок у простір і вимірювання на його границі заданого вигляду характеристик хвиль при проходженні через цей простір.

Велика питома вага апаратури припадає на апаратуру керування динамікою польоту. Такий експеримент ефективний, коли космічні зондуєчі апарати (супутники) тільки відбирають дані, направляючи їх в центр опрацювання та керування. При цьому слід спостерігати за відібраною інформацією для забезпечення коректності експерименту.

Така ж ситуація виникає при спостереженні за станом і керуванні магнітним полем, що є важливим в охороні здоров'я, екології, зв'язку, військових застосуваннях.

Схему експерименту наведено на рис. 1, де показано положення активного (1) і пасивного (2) супутників, що рухаються по спіралі. Зондуючий сигнал передається з активного супутника і приймається пасивним. Інформація пасивного супутника передається на наземні станції спостереження (а, б, в, г). З деяких станцій можна керувати траєкторією, слідкувати за станом експерименту та керувати ним.

Блок-схему апаратури [10] зображено на рис. 2.

Блок оцифровки БОЦ перетворює аналогову інформацію в цифрову. Інтерфейс UNIBUS ОШ (9, 10) — джерело, яке призначене для видачі цифрової інформації в апаратуру системи подальшої телеобробки (СТО). Інтерфейс Q-BUS (1, 4, 8, 11) — джерело, яке призначене для видачі цифрової інформації у блоки апаратури (диспетчеризатор ДИСП спеціалізованих СП, рис. 3). Інтерфейс UNIBUS — Q-BUS (19, 20, 14) призначений для організації повного програмного зв'язку апаратури СОВТІ з апаратурою СТО. Внутрішній інтерфейс СОВТІ — типу Q-BUS (15–18). ДИСП генерує управляючі сигнали необхідні для забезпечення роботи всіх блоків СОВТІ згідно з алгоритмом відображення. Управляюча ЕОМ служить для встановлення режимів СП, ДИСП, КГТ, для контролю роботи СОВТІ, може дублювати роботу окремих процесорів та пристроїв СП, а також для відладки блоків, їх тестування, відладки програмного забезпечення. В одній з версій управляюча ЕОМ виконує функції процесора обробки даних, контролера К, ОЗП і, зокрема ДИСП. При розвитку СОВТІ функції управляючої ЕОМ реалізовувалися апаратно. Блок КГТ орієнтовано на ефективну графічну кольорову півтонову візуалізацію характеристик просторових сигналів в рамках спектрально-кореляційної теорії, тобто часово-просторових спектральних, кореляційних функцій і їх розрізів. Ефективність візуалізації досягається апаратною підтримкою функцій відображення.

Зовнішній вигляд апаратури СОВТІ зображено на рис. 4.

Програмне забезпечення (ПЗ). Програми написані мовою ФОРТРАН та «Асемблер» і реалізовані в операційній системі РАФОС.

Основне призначення ПЗ — організація функціонування СОВТІ за вибраним оператором алгоритмом. З цією метою ПЗ організує:

- діалог з оператором;
- забезпечення зв'язку між блоками і вузлами СОВТІ;
- інтерфейс між приймаючим та реєструючим обладнанням;
- деяку обробку даних;

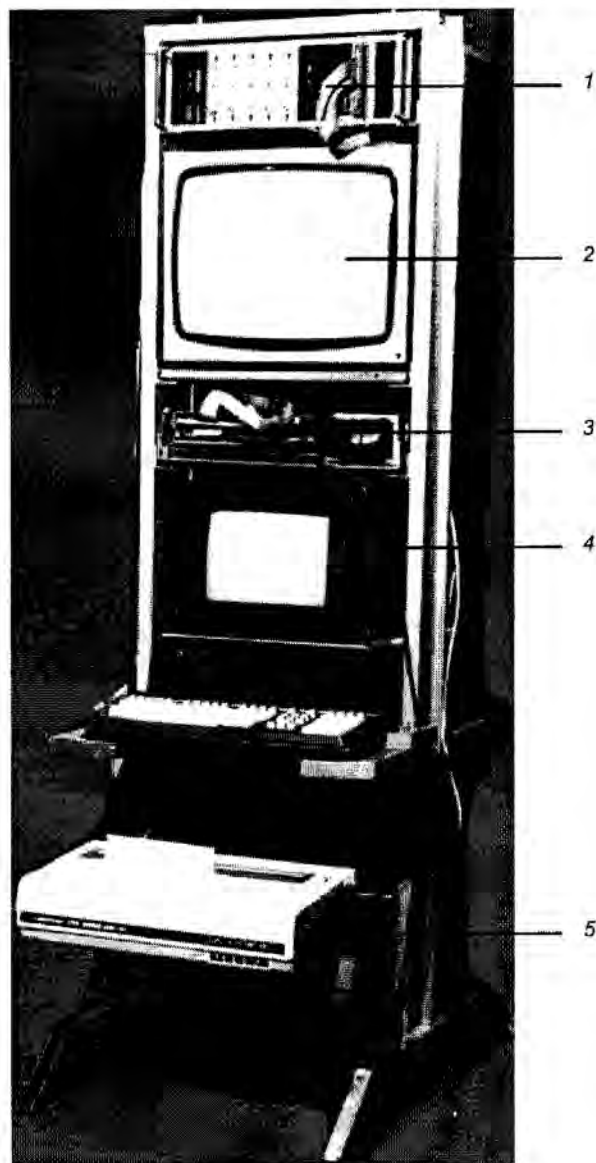


Рис. 4. Зовнішній вигляд підсистеми оперативної обробки та візуалізації оперативної інформації: 1 — БОЦ; 2 — КГТ; 3 — СП; 4 — ДВК; 5 — ВЗУ

д) початкову установку характеристик блоків СОВТІ, їх тестування. ПЗ містить технологічні налагоджувальні засоби, «невидимі» для користувача.

В СОВТІ застосоване розпаралелювання роботи апаратури. Використані мови програмування не дозволяють здійснити паралельне програмування. Тому спеціальна програма організовує розрахунок циклів і програмування блоків.

Результати візуалізації. Вигляд зображень спектрально-кореляційних характеристик (розрізів

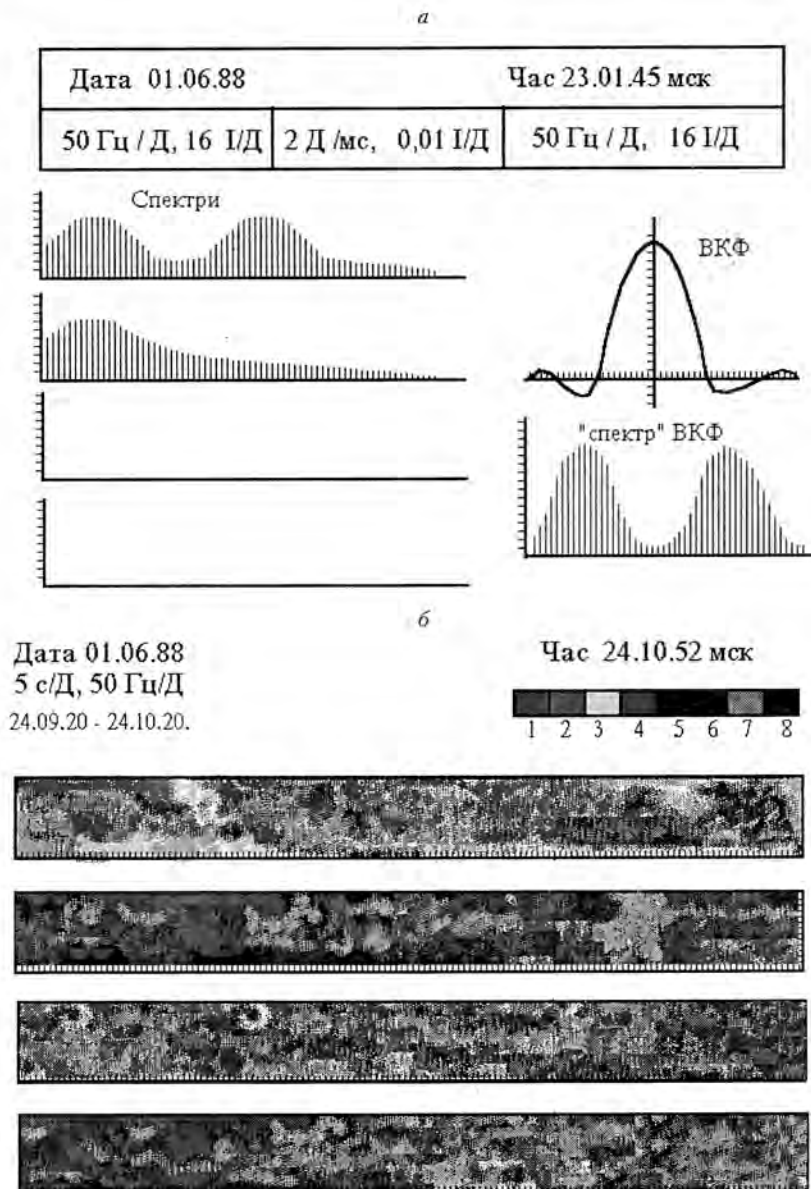


Рис. 5. Спектральний і кореляційний розріз компонентів: а — вигляд спектральних компонентів; б — у різних масштабах

корелограм і спектрограм компонентів) показано на рис. 5. Самі спектрограми оперативно числяться і виводяться на півтоновий кольоровий дисплей в реальному часі. Їх розрізи вибирають при допомозі керованого візира, як і відмітку цікавих ділянок задля їх запису разом із супровідною інформацією.

1. Адамар Ж. Исследование процесса изобретения в области математики. — М.: Сов. радио, 1970. — 152 с.
2. Адлер Ю. П., Грановский Ю. В., Маркова Е. В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. — М.: Знание, 1982. — 64 с. — (Сер. Математика и кибернетика).

3. Горбулія В. П., Завалішин А. П., Негода О. О. та ін. Про державну космічну програму України // Косміч. наука і технологія. — 1995. — 1, № 1. — С. 7–11.
4. Домбровский З. И., Яворский Б. И., Лотоцкий Я. В. Контролер цветного дисплея для экспресс визуализации телеметрической информации // Технические и программные средства телеметрической обработки спутниковой информации: тез. НТК. — М.: Программпром, 1989. — С. 47–48).
5. Драган Я. П. Структура і представлення моделей стохастических сигналов. — Киев: Наук. думка, 1980. — 389 с.
6. Неванлинна Р. Пространство, время и относительность. — М.: Мир, 1966. — 229 с.
7. Прикладна теорія випадкових процесів і полів / Під ред. Я. П. Драган, В. О. Омельченко. — Харків—Львів—Тернопіль: Тернопільський приладобудівний ін-т., 1993. — 248 с.

8. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике. — М.: Мир, 1990. — 240 с.
9. Франко І. Я. Із секретів поетичної творчості. — Київ: Рад. письменник, 1969. — 191 с.
10. Dombrows'kyi Z. I., Dragan J. P., Javors'kyi B. I., Javors'kyi V. I. Backgrounds for on-Earth system development an on-line vizualization of the telemeter information under the active experiment in space // Proc. of IV Ukraine—Russian—Chine Symposium on Space Science and Technology. — Kyiv, 1996. — Vol. 2. — P. 813–815.
11. Dragan J. P. Energetic concept in the theory of nonstationary stochastic signals: representations, transformations, statistical estimations // Latvian signal processing international conference. — Riga: Zinatne, 1990. — Vol. 1. — P. 32–36.
12. Dragan J. P., Chorna L., Javors'kyi B. I. Energy Theory of Stochastic Signals, Separation of Classes and Specification of Statistical Processing Algorithmus // Signal Analysis and Prediction I. Proc. of ECSAP-97. The first European Conference on Signals Analysis and Prediction. — Prague, 1997. — P. 129–132.
13. Franks L. Signal theory. — Englewood Cliffs, New York: Prentice-Hall, 1969. — 317 p.
14. Newman D. J. Is probability a part of mathematical truth // Probabilistic and stochastic methods in analysis and application / Ed. J. S. Byrnes. — Dortrecht: Kluwer, 1992. — 699 p.
15. Sarlemijn A., Kroes P. A. Factors in development of modern physics. — Amsterdam: Elsevier Sc. publ., 1989. — 362 p.

METHOD FOR THE DEVELOPMENT OF SUBSYSTEMS OF SPACE INFORMATION VISUALIZATION

Ya. P. Dragan and B. I. Yavorskyi

A new approach based on the energy concept in the theory of signals is proposed for the development of hardware and software for the visualization of space information. We present some results obtained from the ground-based on-line observations of characteristics of electromagnetic fields.

УДК 681.3

Структуры данных для высокопроизводительных систем обработки космической информации

Б. Т. Деркач

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Розкривається взаємозв'язок між структурами даних і структурою паралельного алгоритму, а також досліджується їх вплив на ефективність реалізації паралельних алгоритмів на обчислювальних системах різної архітектури. Структури даних, що розглядаються, широко застосовуються для розв'язання задач обробки космічної інформації: задачі управління і навігації (лінійна алгебра), кореляційний аналіз, спектральний аналіз (ортогональні перетворення), дослідження і аналіз нестационарних сигналів (перетворення wavelet) та інші.

ВВЕДЕНИЕ

Степень распараллеливания процесса вычислений определяется интенсивностью использования возможности одновременного изменения значений многих переменных. Это особенно важно при организации синхронных параллельных вычислений, в которых элементарные операторы изменяют одновременно значения большого числа переменных. На реализацию таких вычислений ориентирована разработка однородных вычислительных систем [1, 2], а также использование матричных и векторных процессоров типа ILLIAC. Существенное значение для разработки параллельных алгоритмов и проектирования новых структур вычислительных систем имеет изучение структур данных и заданных на них преобразований. Использование различных структур данных влияет на эффективность решения задачи на параллельной вычислительной системе. При проектировании специализированных вычислительных систем по заданной структуре алгоритма структуры данных существенным образом влияют на выбор архитектуры реализующей системы.

СТРУКТУРЫ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ

Формально структуру данных можно определить как пару (D, ρ) , где $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ — множество

объектов данных и $\rho = \{Q_1, \dots, Q_r\}$ — множество бинарных отношений, заданных на D , таких, что $Q_i \subseteq D \times D$. Задавая определенные свойства отношений из ρ , можно получать различные структуры данных. Наиболее важной является структура типа

$$(D, \rho) = (D, \{\leq\}), \quad (1)$$

где $\leq$ обозначает отношение линейного порядка, которое является рефлексивным, асимметричным и транзитивным. Это отношение задает нумерацию на множестве данных $\{d_1, \dots, d_n\}$, т. е. для каждого элемента множества определяется его относительная позиция в D . Такие структуры получили название линейных списков. Простым обобщением последних являются двумерные и многомерные списки. Двумерный список состоит из линейных списков строк $(R_i, \{\leq R_i\})$, $i = 1, \dots, m$, и столбцов $(C_j, \{\leq C_j\})$, $j = 1, \dots, n$. Эти два списка являются взаимно ортогональными, так как задание нумерации в одном из списков определяет положение элементов в другом и наоборот. Очевидно, что матрицу $n \times m$ можно представить двумерным списком одного из вышеуказанных видов. Структуру данных при этом определим так:

$$(D, \rho) = \left(\bigcup_{i=1}^n R_i, \{\leq R_1, \dots, \leq R_n\} \right). \quad (2)$$

Представление метода Гаусса и Гаусса–Жордана в матричной форме позволяет непосредственно перейти к построению параллельных алгоритмов поскольку они описываются с помощью операций

над структурами данных типа (1). Как в том, так и в другом случае вычисления сводятся к выполнению базовых операций: умножению вектора на скаляр и суммированию двух векторов, которые являются операциями над структурами данных типа (1). Под алгоритмом типа (1) будем понимать параллельные вычисления над структурными данными типа (1). При этом справедливы следующие теоремы [2].

Теорема 1. С помощью алгоритма типа (1) прямой ход гауссова исключения для матрицы размерностью $n \times n$ выполняется на n процессорах за $n(n+2)$ тактов.

Теорема 2. Обратный ход с помощью алгоритма типа (1) для матрицы размерностью $n \times n$ на n процессорах выполняется за $2(n-1)$ тактов.

Структура данных типа (1) может быть приведена к виду

$$(D, \rho) = \left(\bigcup_{i=1}^n R_i, \{\leq\} \right).$$

Такая структура получается путем записи элементов матрицы в лексикографическом порядке (по столбцам). В результате получаем линейный список $R_k = \{R_k[1], \dots, R_k[n]\}$, в котором элементам k -го столбца матрицы A соответствует подмножество $\{d[(k-1)n+1], \dots, d[kn]\}$ множества D . Использование представления матрицы структурой вида (2) позволяет провести глубокое распараллеливание алгоритма решения систем линейных алгебраических уравнений на n^2 процессоров. Параллельные вычисления над структурами данных типа (2) назовем алгоритмом типа (2). При таком представлении системы уравнений справедливы теоремы [2].

Теорема 3. С помощью алгоритма типа (2) прямой ход гауссова исключения для матрицы размерностью $n \times n$ на n^2 процессорах выполняется за $3n$ тактов.

Теорема 4. Число тактов для выполнения обратного хода в алгоритме типа (1) и в алгоритме типа (2) одинаково.

СТРУКТУРЫ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ С РАЗРЕЖЕННЫМИ МАТРИЦАМИ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Использование свойств разреженности матрицы коэффициентов имеет существенное значение при построении как последовательных, так и параллельных алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. В случае последовательных алгоритмов можно, используя специальные приемы, хранить в памяти

ЭВМ только ненулевые элементы матрицы [3], а также исключить операции с нулевыми элементами. Это позволяет создавать эффективные алгоритмы решения больших систем уравнений прямыми методами. При построении параллельных алгоритмов, как будет показано ниже, учет разреженности позволяет значительно сократить число процессоров, а в некоторых случаях — число тактов. Нельзя забывать, что при решении системы уравнений с использованием метода исключения Гаусса или другими прямыми методами многие нулевые элементы матрицы становятся ненулевыми. Процесс появления новых ненулевых элементов, называемый заполнением, может значительно снизить эффективность применения прямых методов. Его анализ и ограничение имеют большое значение.

Для описания структуры разреженной матрицы может быть использован граф данных. Вычисления только с ненулевыми элементами матрицы представляются преобразованиями на вершинах графа. Использовать граф для представления структуры разреженной матрицы впервые было предложено в работе [4], а затем этот подход развивался в работах [5, 6]. Такой теоретико-графовый подход даст ряд существенных преимуществ, основным из которых является то, что можно легко осуществлять доступ к ненулевым элементам матрицы. Использование этого свойства позволяет строить эффективные алгоритмы для целого класса матриц, имеющих ту же структуру ненулевых элементов.

Пусть $Ax = b$ — система линейных алгебраических уравнений с разреженной матрицей $A = \|a_{ij}\|$ размерности $n \times n$. Представим структуру ненулевых элементов ориентированным графом $G_\alpha = (V, E, \alpha)$, где $V = \{1, \dots, n\}$ — конечное множество элементов, называемых вершинами, а $E \subseteq V \times V$ — множество дуг. Дуга (i, j) существует только в том случае, если $a_{ij} \neq 0$, т. е. $E = \{(i, j) / a_{ij} \neq 0\}$. Если дуга направлена из данной вершины в нее же, то она называется петлей. Число дуг в таком графе равно общему числу ненулевых элементов матрицы. Симметричной матрице соответствует неориентированный граф. Для графа $G_\alpha = (V, E, \alpha)$ нумерацией называется биекция $\alpha: \{1, \dots, n\} \leftrightarrow V$. Такой граф называется пронумерованным ориентированным. Каждой его вершине поставим в соответствие величину $b(i) = b_i$, каждой дуге (i, j) — величину $a(i, j) = a_{ij}$, если $i \neq j$, и $a(i, j) + 1$, если $i = j$. Тогда система уравнений запишется следующим образом:

$$Q = \left\{ \sum_{i,j \in E} x(j)a(i, j) + b(i) = x(i) \right\},$$

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n.$$

Теперь можно определить процесс гауссова исключения на графе G_α . При переходе от $G_\alpha^{(1)}$ к $G_\alpha^{(2)}$ необходимо провести следующие вычисления на графе: для $(i, 1) \in E$ $b(i) = b(i) \cdot [1 - a(1, 1)]^{-1} \cdot a(1, 1)$. Если в графе есть дуги $(i, 1) \in E^{(1)}$ и $(1, j) \in E^{(1)}$ и при этом $(i, j) \notin E^{(1)}$, то необходимо добавить новую дугу (i, j) с величиной $a(i, j) \neq 0$. В общем случае имеем $a(i, j) = a(i, j) + a(i, k)[1 - a(k, k)]^{-1} \cdot a(k, j)$.

Прямой ход гауссова исключения представляется теперь как цепочка преобразований $G_\alpha^{(1)} \rightarrow G_\alpha^{(2)} \rightarrow \dots \rightarrow G_\alpha^{(n)}$.

Рассмотрим, используя теоретико-графовый подход, как разреженность матрицы A влияет на основные характеристики параллельных алгоритмов, такие как число тактов и процессоров, для алгоритмов типа (1) и (2).

Обозначим через $d_+^{(k)}(i)$, $i \in V^{(k)}$ число дуг, входящих в вершину i , а через $d_-^{(k)}(i)$, $i \in V^{(k)}$ — число дуг, исходящих из вершины i . Будем считать, что граф G_α является сильно связным, т. е. для любой пары вершин i, j в графе существует связывающий их путь.

Пусть задана система линейных алгебраических уравнений вида $Ax = b$ с разреженной матрицей $n \times n$. Тогда справедлива следующая теорема [2]:

Теорема 5. Для выполнения прямого хода гауссова исключения по алгоритму типа (1) необходимое число процессоров p определяется следующим образом:

$$p = \max_k d_+^{(k)}(i), i \in V, k = 1, \dots, n-1.$$

Теорема 6. Прямой ход гауссова исключения по алгоритму типа (1) выполняется за T_p тактов, где

$$T_p = \sum_{k=1}^{n-1} 2d_-^{(k)}(i) + 3.$$

Теорема 7. Для вычисления прямого хода гауссова исключения по алгоритму типа (2) необходимое число процессоров составит

$$p = \max_k d_+^{(k)}(i) \cdot d_-^{(k)}(i), k = 1, \dots, n.$$

Теорема 8. Число тактов для разреженной матрицы при использовании алгоритма типа (2), как и для заполненной, равно $T_p = 3n$.

Процесс заполнения можно значительно уменьшить, если использовать стратегию выбора ведущего элемента на каждом шаге гауссова исключения, приводящую к минимальному заполнению. Одним

из наиболее простых критериев выбора главного элемента является критерий Марковича. Ведущий элемент выбирается так, чтобы суммарное число ненулевых элементов в k -й строке и в k -м столбце было минимальным.

Как известно, выбор главного элемента сильно влияет на устойчивость численного решения системы. При этом, к сожалению, При этом, к сожалению, стратегия минимального заполнения и численной устойчивости конфликтуют при выборе ведущих элементов. Поэтому, как правило, используются компромиссные стратегии.

СТРУКТУРЫ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В последние годы активизировался интерес к представлению бинарных изображений с помощью графов. Рассматриваются представления деревьями степени 2 — бинарными деревьями, степени 4 — квадрант-деревьями, степени 8 — октальными деревьями и другие. По-видимому, наиболее оптимальным является представление изображения квадрант-деревьями. Пусть имеется 2^n на 2^n бинарное изображение I . Для него квадрант-дерево строится следующим образом. Если изображение состоит из одних полей или из одних единиц, то в этом случае изображение состоит из одной вершины, которой присваивается значение 0 или 1. В противном случае из корневой вершины, представляющей все изображение, проводятся дуги к четырём вершинам, соответствующим квадрантам изображения. Для каждой вершины процесс повторяется снова. Процесс заканчивается, если вершина дерева соответствует блоку изображения, состоящему из одних полей или одних единиц. Максимальное количество уровней в дереве для изображения 2^n на 2^n равно n . На самом нижнем уровне вершина дерева соответствует одному элементу изображения. Каждый узел квадрант-дерева может храниться в форме записи с шестью полями, содержащими указатели на предыдущую вершину, следующие вершины и значение типа узла (чёрный, белый или серый). Направления к дочерним вершинам определяются из набора: верхний левый, верхний правый, нижний левый, нижний правый и кодируются соответственно 1, 2, 3, 4. Каждый узел дерева представлен своим кодом размещения, который может определяться из выражения [7]:

$$z_i = \begin{cases} 0, & i = m, \\ z_i + x_{i-1}, & m < i < n, \end{cases}$$

где z — код размещения вершины (номер), а $x_i = 1, 2, 3, 4$.

Такой подход к кодированию бинарных изображений позволяет получить значительную экономию памяти, необходимой для хранения изображения, кроме того, позволяет значительно повысить эффективность некоторых операций для обработки изображений.

Одним из возможных способов реализовать такой подход с максимальной эффективностью состоит в использовании ассоциативных алгоритмов и структуры для выполнения операций над изображениями, кодированными с помощью квадрант-деревьев. Кодированное изображение в ассоциативной памяти хранится в виде кодированных наборов. Такое представление позволяет в ассоциативном процессоре эффективно реализовать сортировку вершин по уровням, что в свою очередь значительно убыстряет сравнение исходного изображения с эталоном. Пусть $I^{(k)}$ и $I'^{(k)}$ — множество кодированных наборов k -го уровня квадрант-деревьев изображений I и I' . Если на k -м уровне эти наборы сильно отличаются друг от друга, то тогда отпадает необходимость проведения сравнения на более низких уровнях. Поэтому операция сравнения изображений на ассоциативном процессоре будет очень быстрой.

Очень эффективной будет реализация метода моментов на ассоциативном параллельном процессоре. Момент изображения определяется так: $m_{ij} = \sum \sum f(x, y) x^i y^j$, где сумма берется по всем точкам изображения. Для бинарного изображения в состав суммы войдут только те точки, в которых изображение равно 1. В частности, момент m_{00} определяется количеством единиц в изображении. Так как момент изображения равен сумме моментов его блоков, то становится ясным смысл применения ассоциативного процессора для вычисления моментов изображения. Вычисление момента сведется к поиску черных вершин в квадрант-дереве, каждое из которых в зависимости от уровня k , представляет собой блок размером 2^k на 2^k .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений прямыми методами при использовании структур данных типа (1) и типа (2) видно, что получаются параллельные алгоритмы с существенно различными характеристиками.

При решении систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами коэффициентов и использовании представления матрицы

ориентированным графом показана возможность построения оптимальных по количеству тактов и ширине параллельных алгоритмов. Тем не менее, эти алгоритмы не могут быть эффективно реализованы на параллельных структурах типа векторных или матричных процессоров, поскольку они не позволяют осуществлять эффективный доступ к данным, представленным в виде графовых или древовидных структур. Затраты на межпроцессорные пересылки данных не позволяют получить общий эффект, который мог бы быть достигнут за счет исключения операций с нулевыми элементами матрицы.

Аналогичная ситуация прослеживается на примере алгоритмов обработки изображений. Рассмотренные алгоритмы выполнения операций с изображениями на ассоциативном параллельном процессоре показывают возможность эффективного применения ассоциативной обработки.

Поскольку древовидные структуры данных широко используются и при решении многих других задач, особенно информационно-логического характера, весьма важным является разработка вычислительных структур, позволяющих реализовать такие операции с наибольшей эффективностью.

1. Грицик В. В., Деркач Б. Т., Куликов С. П. и др. Повышение эффективности и производительности решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами коэффициентов. — Львов, 1980. — 54 с. — (Препринт / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 31).
2. Параллельная обработка информации. — Киев: Наук. думка, 1986. — Т. 3. — 288 с.
3. Brameller A., Allan R. Sparsity its practical application to system analysis. — London: 1976. — 192 p.
4. Duff I. S., Reid J. K. A comparison of sparsity orderings for obtaining a pivot sequence in Gaussian Elimination // J. Inst. Math. and Appl. — 1971. — N 4. — P. 281 — 291.
5. Gentelman W. M., George A. Sparse matrix software // Sparse matrix comput. — New York: Acad. press, 1976. — P. 243 — 262.
6. Heller D. A. Survey of parallel algorithms in numerical linear algebra // SIAM. — 1978. — 20, N 4. — P. 740 — 777.
7. Samet H. Data structures for quadtree approximation and compression // Commun ACM. — 1985. — 28, N 5. — P. 973 — 979.

DATA STRUCTURES FOR SPACE DATA COMPUTATION ON HIGH-PERFORMANCE COMPUTER SYSTEMS

B. T. Derkach

Data structures for the most important computing algorithms are proposed. Such data structures can be used for an efficient implementation of the linear algebra, Fourier transform, wavelet transform, image processing, and others algorithms.

УДК 528.852:681.325

Ковзні рангові перетворення аерокосмічних зображень з класифікацією елементів за характеристиками об'єктів

Р. А. Воробель

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98.

Проаналізовано методи підвищення локальних контрастів зображень з використанням ковзних рангових перетворень. Показано, що зважені ковзні рангові перетворення вимагають точного визначення контрастності елементів. Запропоновано узагальнену лінійну t -еквалізацію, основою якої є зважені рангові перетворення з класифікацією елементів за характеристиками об'єктів. Вона забезпечує ефективне керування підсиленням локальних контрастів зображень.

Одним з способів обробки аерокосмічних знімків земної поверхні з метою покращання можливостей їх аналізу та інтерпретації є підсилення локальних контрастів, текстури та дрібних тонкоструктурних деталей зображення [2, 11, 13]. Значну роль тут відіграють методи, які використовують ковзні рангові перетворення [1, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16]. Метою такої обробки є підвищення локальних контрастів, тому для кожного елемента зображення вимірюють його відмінності з оточуючими елементами і підсилюють їх. При цьому розглядають дискретизовані монохромні напівтонові зображення, що представляються у цифровому виді матрицею з $N \times M$ елементів X_{ij} , де $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$. Значення елемента X_{ij} зображення (i — номер рядка, j — номер стовпчика) є квантованим на K рівнів значенням оптичної густини чи яскравості, що обмежене діапазоном $0 \leq X_{ij} \leq K - 1$. Найпростішим з методів обробки в просторовій області тут є згадані вже ковзні рангові перетворення (КРП), які полягають в ковзному вирівнюванні гістограми елементів вхідного зображення [14, 15] шляхом заміни значення X_{ij} центрального елемента околу W_{ij} заданої наперед форми (найчастіше — квадрат чи прямокутник) на його нормований локальний ранг

$$Y_{ij} = \alpha \cdot \text{rank}(X_{ij}) = \alpha \sum_{k=0}^{X_{ij}} H^{(ij)}(k) = \alpha \sum_{Z \in W_{ij}} \sigma(Z, X_{ij}) = \alpha \sum_{Z=-[m/2]}^{m-[m/2]-1} \sum_{\beta=-[n/2]}^{n-[n/2]-1} \sigma(X_{ij+\beta}, X_{ij}), \quad (1)$$

де α — нормуючий коефіцієнт

$$\alpha = \frac{K-1}{\text{mes}(W_{ij})} = \frac{K-1}{nm},$$

де K — кількість рівнів квантування елементів зображення, n, m — розміри ковзної області W_{ij} , $\text{mes}(W_{ij}) = nm$ — кількість елементів в околі W_{ij} центральної точки (i, j) , $H^U(k)$ — значення k -го відліку гістограми розподілу за величиною елементів околу W_{ij} , $\sigma(Z, X_{ij})$ — функція належності

$$\sigma(Z, X_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{при } Z \leq X_{ij}, \\ 0 & \text{при } Z > X_{ij}. \end{cases} \quad (2)$$

Як випливає з виразів (1) і (2), результат Y_{ij} операції КРП визначається відношенням кількості елементів в околі W_{ij} , значення яких не більші за X_{ij} , до загальної кількості елементів околу W_{ij} .

Фактично вираз (1) є дискретним аналогом ви-

значення ковзного нормованого значення функції розподілу імовірності величини елементів неперервного локального зображення [17], реалізованого шляхом застосування для інтегрування формули прямокутників.

Операція КРП дозволяє здійснити нелінійне підсилення високочастотної складової зображення. Це приводить до підвищення деталістості зображень, однак супроводжується зменшенням контрастності слабоконтрастних тонкоструктурних об'єктів і до погіршення зорового сприйняття зображень. Одним з варіантів усунення цього недоліку є використання класифікації елементів зображень за характеристиками об'єктів, яким вони належать. Однією з таких характеристик є контраст. Такий підхід дозволяє формувати зображення, в яких більш якісно відображаються дрібні деталі, що належать слабоконтрастним тонкоструктурним об'єктам. Елементи зображення, що належать висококонтрастним об'єктам, залишаються без змін. Для цієї мети використовують зважені КРП [1]. Цей метод враховує класифікацію елементів зображення за контрастністю об'єктів, яким вони належать, і здійснює переважне підсилення тих елементів, котрі належать слабоконтрастним об'єктам. Фактично він базується на двоетапній роботі, де одним з етапів є виявлення елементів, що належать об'єкту, а іншим — класифікація цих елементів за контрастністю і корекція величини цих елементів залежно від контрасту.

Для реалізації такого двоетапного підходу значенню $X_{\gamma\beta}$ елемента (γ, β) присвоюється вага $\vartheta_{\gamma\beta}$, що характеризує вклад даного елемента в операцію КРП. Вона вибирається більшою, якщо елемент (γ, β) належить до слабоконтрастного об'єкта, і малою — якщо він належить до висококонтрастного об'єкта. Далі за аналогією з (1) визначається сума ваг $\vartheta_{\gamma\beta}$ тих елементів $X_{\gamma\beta}$ околу W_{ij} , для яких значення $X_{\gamma\beta}$ не більше X_{ij} в центральній точці (i, j) околу W_{ij} . Поділивши одержану суму на загальну суму ваг $\vartheta_{\gamma\beta}$ для всіх елементів околу W_{ij} та помноживши результат на нормуючий коефіцієнт α , отримуємо значення $Y_{ij}^{(2)}$ зваженого КРП.

Вхідне зображення обробляється прямокутною апертурою W_{ij} зі сторонами $n \times m$ елементів ковзним способом, тобто елемент за елементом $i = 1, \dots, N$ в межах рядка вхідного зображення та рядком $j = 1, \dots, M$ в межах всього зображення. При цьому визначаються нові значення центрального елемента ковзного вікна з координатами (i, j) при визначенні його належності до слабоконтрастного чи висококонтрастного об'єкта.

Для класифікації елементів за контрастністю використовується оцінка динамічного діапазону h зміни їх величини. Вона визначається як різниця між максимальним і мінімальним значеннями елементів у деякій області R . Для діапазону h характерним є те, що найбільш інформативним є його зміна від значень $h_{\min}$ до значень $h_{\max}$. Саме в цьому випадку при $h_{\min} < h < h_{\max}$ здійснюється суттєва зміна величини елементів вхідного зображення. Значення $h < h_{\min}$ характерні для тих ділянок зображення, які належать фону або ж елементи зображення відрізняються один від одного за рахунок шуму. Значення $h > h_{\max}$ характерні для тих ділянок зображення, на яких елементи належать об'єктам і відображаються з достатнім для сприйняття людиною-оператором контрастом.

Можливий варіант узагальненої вагової функції $f(h)$ для підсилення локальних контрастів тонкоструктурних об'єктів товщиною в один елемент, показаний на рис. 1. В цілому вираз для визначення h як оцінки контрасту елемента з координатами (γ, β) об'єкта в околі R має вид

$$h_{\gamma\beta} = \left[\max_{-\left[\frac{q}{2}\right] \leq r \leq \left[\frac{q}{2}\right]-1} X_{\gamma, \beta+r} - \min_{-\left[\frac{q}{2}\right] \leq r \leq \left[\frac{q}{2}\right]-1} X_{\gamma, \beta+r} \right] \quad (3)$$

де q — розмір сторони прямокутного вікна в кількостях елементів для визначення діапазону h в області R (в даному випадку область R задається вікном розміром $1 \times q$ елементів); $X_{\gamma, \beta+r}$ — значення елементів вхідного зображення, що попадають в ковзну область R , r — поточний номер елемента вхідного зображення, що попадає в область R ($r = 1, \dots, q$); $\gamma\beta$ — поточні координати елемента вхідного зображення в ковзній апертурі W_{ij} .

Ваговий коефіцієнт $\vartheta_{\gamma\beta}$ визначається за формулою

$$\vartheta_{\gamma\beta} = 1 + \tau f(h_{\gamma\beta}),$$

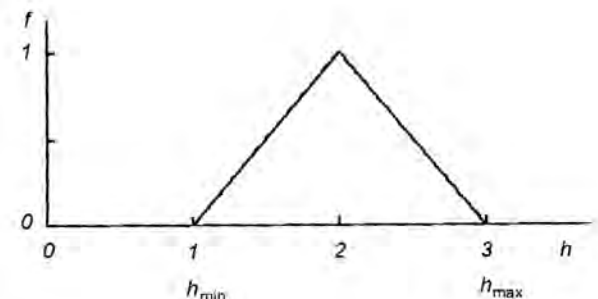


Рис. 1. Вагова функція підсилення локальних контрастів тонкоструктурних об'єктів товщиною в один елемент

де τ — коефіцієнт підсилення локальних контрастів деталей слабоконтрастних тонкоструктурних об'єктів.

За аналогією з КРП визначається сума вагових коефіцієнтів ϑ_{ij} тих елементів вхідного зображення, котрі попадають в ковзну апертуру W_{ij} і значення яких не перевершують значення центрального елемента X_{ij} . В такий спосіб реалізується зважене рангове перетворення величин елементів вхідного зображення. Безпосереднє обчислення результату перетворення здійснюється за формулою

$$Y_{ij}^{(2)} = (K - 1) \times$$

$$\times \frac{\sum_{\gamma=-[n/2]}^{n-[n/2]-1} \sum_{\beta=-[m/2]}^{m-[m/2]-1} \vartheta_{i+\gamma, j+\beta} \sigma(X_{i+\gamma, j+\beta}, X_{ij})}{\sum_{\gamma=-[n/2]}^{n-[n/2]-1} \sum_{\beta=-[m/2]}^{m-[m/2]-1} \vartheta_{i+\gamma, j+\beta}}, \quad (4)$$

де $\sigma(X_{i+\gamma, j+\beta}, X_{ij})$ — функція належності, що визначається як

$$\sigma(X_{i+\gamma, j+\beta}, X_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{при } X_{i+\gamma, j+\beta} \leq X_{ij}, \\ 0 & \text{при } X_{i+\gamma, j+\beta} > X_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

Зважене КРП дозволяє підсилити детальність і локальний контраст тонкоструктурних об'єктів за рахунок збільшення розмірів їх елементів. Однак це має місце тільки у тому випадку, коли об'єкт «опуклий» (елемент об'єкта більший за елемент фону). Коли ж об'єкт «вгнутий» (елемент об'єкта менший за елемент фону), то контраст цих об'єктів зменшується. Це проілюстровано на рис. 2, де вибрано відеосигнал одного рядка зображення (крива 1), який містить елемент тонкого структурного «опуклого» слабоконтрастного об'єкта (при $i = 9$) і об'єкта з достатнім контрастом (при $i = 13$). Крива 2 представляє оброблений відеосигнал з використанням КРП за алгоритмом (1) з апертурою W розміром 1×5 елементів. Крива 3 реалізує оброблений відеосигнал з використанням зваженого КРП за алгоритмом (4) з тією ж апертурою W , апертурою R розміром 1×2 і ваговою функцією $f(h_{\beta})$, що на рис. 1, яка збільшує величину елементів тонкоструктурних об'єктів товщиною в один елемент з коефіцієнтом підсилення локальних контрастів $\tau = 4$. Вона підтверджує підсилення тонкоструктурного «опуклого» об'єкта товщиною в 1 елемент з перепадом амплітуди $h_{\beta} = 2$ при $i = 9$ в порівнянні з застосуванням звичайного КРП (крива 2). Однак величини елементів навколо нього при цьому змінені несиметрично. Це обумовлено тим, що область R складається тільки з двох елементів ($q =$

$= 2$), а виділення об'єкта і оцінка його контрасту здійснюється за допомогою виразу (3). Цей вираз добрий для зображень, що представляються кусково-постійною моделлю. Якщо ж зображення представляються кусково-лінійною моделлю, то використання виразу (3) приводить до неточностей через помилкове фіксування певного контрасту об'єкта, який фактично відсутній. Збільшення ж області R до $q = 3$ приводить до зменшення ефекту підсилення контрасту тонкоструктурного об'єкта. Щоб усунути цей недолік, можна використати для оцінки локального контрасту (для об'єкта шириною в один елемент) різницевого фільтр з ваговими коефіцієнтами 1, -2, 1 [18]

$$h_{\beta}^* = 0.5 |X_{\gamma, \beta-1} - 2X_{\gamma, \beta} + X_{\gamma, \beta+1}|. \quad (6)$$

Такий фільтр симетричний і стійкий як до кусково-постійної, так і лінійної зміни фону. Завдяки цьому можна точніше оцінювати локальний контраст тонкоструктурних об'єктів. Приклад застосування цього фільтра показаний на рис. 2 (крива 4), де його використання привело до симетричної зміни величини елементів навколо об'єкта при $i = 9$.

На рис. 3 показаний відеосигнал 1, що є доповненням до відеосигналу 1 на рис. 2. Крива 2 тут теж відображає застосування процедури КРП, а 3 — зваженого КРП за алгоритмом (4) і $h_{\beta} = h_{\beta}^*$. Інверсія зображення привела до зміни характеру кривизни тонкоструктурних об'єктів (при $i = 5, 9, 13$). З «опуклих» вони перетворилися у «вгнути».

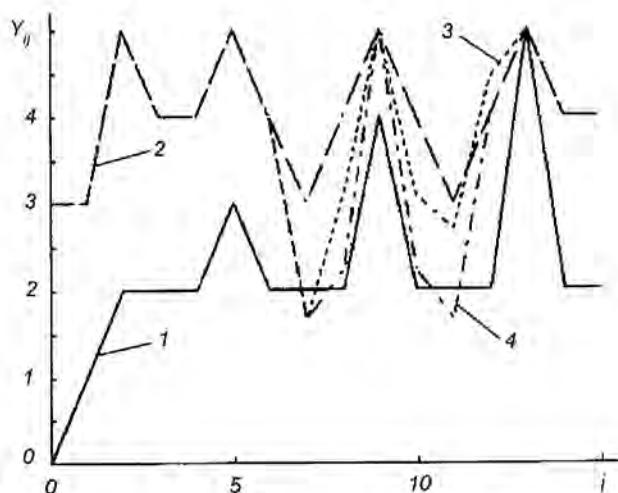


Рис. 2. Відеосигнал зображення з «опуклими» об'єктами (1) і його зважені КРП: 2 — за алгоритмом (1), 3 — за алгоритмом (4), 4 — після застосування фільтра (6)

Як видно з кривої 3 тут величина елемента тонко-структурного «вгнутого» об'єкта товщиною в один елемент з перепадом $h_{\gamma\beta} = 2$ при $i = 9$ збільшується, що приводить до гіршого результату, ніж у звичайній процедурі КРП, де (крива 2) локальний контраст елемента «опуклого» об'єкта збільшується за рахунок збільшення елементів фону. В даному випадку процедура описаного зваженого КРП за алгоритмом (4) не приводить до підсилення локального контрасту (крива 3) в порівнянні з методом КРП (крива 2), бо величина елемента «вгнутого» об'єкта при $i = 9$ збільшена. Для збільшення локального контрасту даного елемента необхідне не збільшення, а зменшення його величини. Для усунення цього недоліку була запропонована [4, 5] модифікація зваженого КРП, яка поряд з класифікацією елементів за контрастністю об'єктів використовувала ще й класифікацію за додатковою характеристикою об'єктів — їх типом: «внутрі» вони чи «опуклі». Для цього використовувалася найпростіша оцінка — порівняння елемента зображення з рівнем фону. Реалізовувалася вона шляхом обчислень ковзного середнього з центром в елементі (i, j)

$$\bar{X}_{ij} = \frac{1}{nm} \sum_{\gamma=-[n/2]}^{n-[n/2]-1} \sum_{\beta=-[m/2]}^{m-[m/2]-1} X_{i+\gamma, j+\beta} \quad (7)$$

При цьому тип θ об'єкта, якому належить цей елемент, визначається формулою

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{при } X_{ij} > \bar{X}_{ij}, \\ 1 & \text{при } X_{ij} \leq \bar{X}_{ij}. \end{cases} \quad (8)$$

Отже, якщо величина елемента X_{ij} більша за рівень фону $\bar{X}_{ij}$, то елемент належить «опуклому» об'єкту ($\theta = 0$), якщо ж ні — то «вгнутому» ($\theta = 1$).

Так як для слабкоконтрастного «вгнутого» об'єкта необхідно зменшувати його величину, то вага в даному випадку визначалася виразом [5]

$$v_{\gamma\beta} = 1 - \frac{\tau f(h_{\gamma\beta})}{1 + \tau}, \quad (9)$$

або для узагальненого випадку —

$$v_{\gamma\beta} = 1 + (-1)^\theta \tau (1 + \tau)^{-u} f(h_{\gamma\beta}), \quad (10)$$

де

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{якщо об'єкт "опуклий",} \\ 1, & \text{якщо об'єкт "вгнутий".} \end{cases}$$

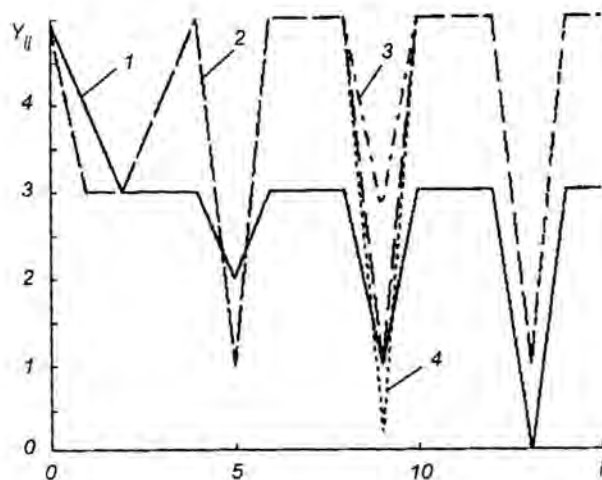


Рис. 3. Відеосигнал зображення з «внутрішніми» об'єктами (1) і його зважені КРП — за алгоритмом (1), 3 — за алгоритмом (4), 4 — за запропонованим методом

При цьому нормований контраст елементів зображення визначався за допомогою лінійного його опису [5, 7]

$$C_{\gamma\beta} = \frac{|X_{\gamma\beta} - \bar{X}_{\gamma\beta}|}{K - 1}, \quad (11)$$

де

$$\bar{X}_{\gamma\beta} = \frac{1}{ql} \sum_{t=-[q/2]}^{q-[q/2]-1} \sum_{s=-[l/2]}^{l-[l/2]-1} X_{\gamma+t, \beta+s}, \quad (12)$$

а контраст в абсолютних одиницях

$$h_{\gamma\beta} = (K - 1) C_{\gamma\beta} = |X_{\gamma\beta} - \bar{X}_{\gamma\beta}|. \quad (13)$$

В цілому узагальнений алгоритм реалізації симетричних зважених КРП з класифікацією елементів зображень як за контрастністю об'єктів, так і за їх типом полягає в наступному.

Крок 1. Задаємо розміри n і m ковзної області W_{ij} , розміри r і l ковзної області R , коефіцієнт τ підсилення локальних контрастів та функцію $f(h_{\gamma\beta})$.

Крок 2. Визначаємо ковзне середнє $\bar{X}_{ij}$ за формулою (7).

Крок 3. Визначаємо тип об'єкта θ , якому належить елемент X_{ij} зображення області W_{ij} , за формулою (8).

Крок 4. Обчислюємо оцінку контрасту $h_{\gamma\beta}$, використовуючи формулу (13) та відповідне їм значення $f(h_{\gamma\beta})$.

Крок 5. Визначаємо вагу $v_{\gamma\beta}$ елемента $X_{\gamma\beta}$ області W_{ij} за формулою (10).

Крок 6. Визначаємо функцію належності σ за формулою (5).

Крок 7. Повторюємо обчислення, починаючи з кроку 2, для кожного елемента зображення X_{ij} , що попадає в ковзну область W_{ij} .

Крок 8. Обчислюємо остаточне значення симетричного КРП $Y_{ij}^{(2)}$ за формулою (4).

Крок 9. Вибираємо наступний елемент X_{ij} зображення.

Крок 10. Повторюємо обчислення з кроку 2 для всіх елементів зображення.

Приклад, що підтверджує ефективність запропонованого методу ковзного симетричного зваженого рангового перетворення наведений на рис. 3, крива 4. За вхідний вибрано той же відеосигнал (крива 1) з трьома «вгнутими» об'єктами товщиною в один елемент і різної контрастності при $i = 5, 9, 13$. Аналогічні також параметри ковзної області W_{ij} , коефіцієнт $\tau = 4$ підсилення локального контрасту і вагова функція $f(h_{ij})$ (рис. 1). Область R має розміри 1×3 елементи ($q = 3, l = 1$). На відміну від отриманого результату зваженого КРП за виразом (4) без класифікації за типом кривизни об'єкта (крива 3), запропонований підхід дозволяє підсилити локальний контраст «вгнутого» об'єкта (крива 4). При $i = 9$, у відповідності з заданою ваговою функцією, підсилений локальний контраст тошкоструктурного об'єкта товщиною в один елемент з $h_{ij} = 2$ шляхом зменшення його величини. У випадку ж застосування запропонованого методу перетворення до сигналу, що показаний на рис. 2 (крива 1) при вказаних вище параметрах W_{ij} , τ і

$f(h)$, результат перетворення збігається з кривою 4 на цьому ж рисунку.

Описаний підхід модифікованого КРП дозволяє в цілому ефективно підсилити високочастотні складові зображення. Однак вибором тільки розмірів n і m ковзної апертури W_{ij} не завжди вдається ефективно керувати підсиленням локальних контрастів всього зображення. Для здійснення такої керуваності пропонується поєднати метод КРП з фіксованим підсиленням локальних контрастів. Для цього представимо результуюче зображення Z_{ij} як суму вхідного X_{ij} та обробленого $Y_{ij}^{(2)}$ шляхом запропонованого симетричного зваженого КРП

$$Z_{ij} = X_{ij} + \alpha(Y_{ij}^{(2)} - X_{ij}), \quad (14)$$

де α – фіксований коефіцієнт підсилення, $0 < \alpha \leq 1$.

При $\alpha = 0$ $Z_{ij} = X_{ij}$, а при $\alpha = 1$ $Z_{ij} = Y_{ij}^{(2)}$. Тобто, шляхом зміни величини α можна змінювати підсилення локальних контрастів всього зображення. Представимо вираз (14) як

$$Z_{ij} = (1 - \alpha)X_{ij} + \alpha Y_{ij}^{(2)} = \beta X_{ij} + \alpha Y_{ij}^{(2)}. \quad (15)$$

Вираз (15) є узагальненням виразу для лінійної f -еквалізації [12], де перетворене зображення являє собою зважену суму еквалізованого і вхідного зображення для випадку ковзної реалізації. Однак в (15) зваженим є ще й саме еквалізоване зображення, що відображається складовою $Y_{ij}^{(2)}$. У випадку ж вибору $f(h_{ij}) = \text{const} = 0$ вираз (15) вироджується у вираз для згаданої вже лінійної f -еквалізації через відсутність зваження елементів.

На рис. 4 проілюстровано процес керуваності підсиленням локальних контрастів зображення на прикладі відеосигналу, що на рис. 2 (крива 1) через використання зважених рангових перетворень в узагальненій f -еквалізації при $\alpha = 0.3$ (крива 1) та $\alpha = 0.7$ (крива 2).

Підсумовуючи викладене, зазначимо, що описана модифікація ковзних зважених рангових перетворень зображення, що використовують класифікацію елементів за такими характеристиками, як контраст та тип кривизни об'єктів, а також можливість простого керування підсиленням локальних контрастів через використання узагальненої лінійної f -еквалізації дозволяють проводити ефективну обробку аерокосмічних зображень. При цьому забезпечуються її простота, висока швидкість та поліпшення візуального сприйняття перетворених зображень.

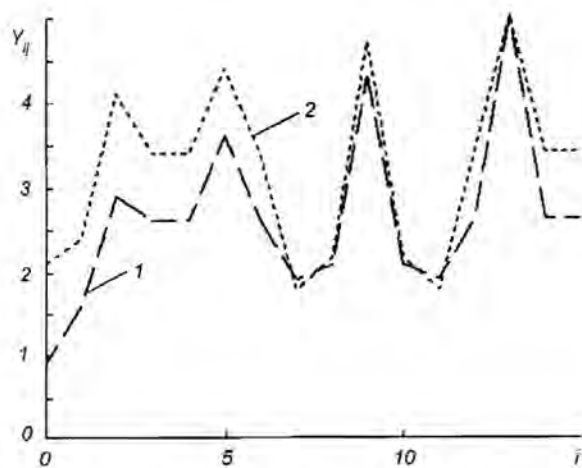


Рис. 4. Відеосигнали зображень з різним підсиленням локальних контрастів, отримані узагальненою f -еквалізацією на основі зважених КРП: 1 – $\alpha = 0.3$, 2 – $\alpha = 0.7$

1. А. с. 1672490 СССР, МКИ ... Устройство для преобразования изображений объектов / Ю. А. Лысенко, С. А. Елманов. — Оpubл. 00.00.91, Бюл. № 31.
2. Беликова Т. П., Кропид М. А., Чочиа П. А. и др. Цифровая обработка фотоснимков поверхности Марса, переданных АМС «Марс-4» и «Марс-5» // Космич. исследования. — 1975. — 13, № 16. — С. 898–906.
3. Беликова Т. П., Ярославский Л. П. Использование адаптивных амплитудных преобразований для препарирования изображений // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общ. техн. — 1974. — Вып. 14. — С. 88–98.
4. Воробель Р. А. Ковзне перетворення зображень з класифікацією елементів за контрастністю об'єктів / Автоматика-95: Друга Укр. конф. з автоматичного керування, 26–30 вересня 1995 р. Праці. — Львів: НТЦ ІТІС, 1995. — Т. 3. — С. 95–98.
5. Воробель Р. А. Скользящие взвешенные ранговые преобразования изображений // Пробл. упр. и информатики. — 1997. — № 2. — С. 65–74.
6. Воробель Р. А. Ядра визначення контрасту елементів зображення // Відбір і обробка інформації. — 1997. — Вип. 11(87). — С. 96–102.
7. Воробель Р. А. Лінійний опис визначення контрастності елементів зображення // Доповіді НАН України. — 1998. — № 1. — С. 127–131.
8. Воробель Р. А., Ошир Н. В., Попов Б. О. Деякі методи обробки зображень у задачах рентгенографічного контролю якості виробів // Фіз.-хім. мех. матеріалів. — 1997. — № 5. — С. 93–98.
9. Ким В., Ярославский Л. Ранговые алгоритмы обработки изображений. — М., 1985. — 40 с. — (Рукопись деп. в ВИНИТИ 30.05.85 г., № 3793–85 Деп.).
10. Очин Е. Ф. Вычислительные системы обработки изображений — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 136 с.
11. Чочиа П. А. Методы улучшения аэрокосмических изображений, использующие гистограмму по фрагменту // Исслед. Земли из космоса. — 1985. — № 6. — С. 66–72.
12. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
13. Chochia P. A. Image enhancement using sliding histograms // Comput. vision, graphics and image processing. — 1988. — 44, N 2. — P. 211–229.
14. Hall E. L. Almost uniform distribution for computer image enhancement // IEEE Trans. Comput. — 1974. — C-23, N 2. — P. 207–208.
15. Ketcham D. J. Real time image enhancement technique // Pacif. Grove. — 1976. — 74, N 2. — P. 120–125. — (Proceeding SPIE/OSA conference on image processing).
16. Kim V., Yaroslavskii L. Rank algorithms for picture rocessing // Comput. vision, graphics and image processing. — 1986. — 35, N 2. — P. 234–258.
17. Pratt W. Digital image processing. — New York: Wiley, 1978. — 480 p.
18. Preston K. Jr., Duff M. J. B., Levialdi S., Norgen P. E., Toriwaki J.-I. Basic of cellular logic with some applications in medical image processing // Proc. IEEE. — 1979. — 67, N 5. — P. 826–856.

MOVING RANK TRANSFORMATIONS OF AIRSPACE IMAGES WITH PIXEL CLASSIFICATION BY OBJECT CHARACTERISTICS

R. A. Vorobel

We analyses the use of moving rank transformations for local contrast enhancement of images. Weighted moving rank transformation are shown to need an exactly determined contrast of pixels. We propose a generalized linear f -equalization based on the weighted moving rank transformations with pixel classification by object characteristics. The equalization provides an efficient control over the enhancement of local contrasts of images.

УДК. 551.46.581.19

Інформаційний відеоскоп — базовий елемент автоматизованого робочого місця космонавта-дослідника

В. М. Чинок

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 24.03.98

Пропонується до розгляду інформаційний відеоскоп — широкопрофільний прилад для автоматизації космічних наукових досліджень, демонструється сфера його застосування і спектр його модифікацій.

ВСТУП

Створення на орбіті Землі довготривалих орбітальних космічних станцій ставить перед розробниками космічних програм ряд завдань. В першу чергу, використання космосу для потреб людства. Друге — це вирішення задач космічної науки: астрофізики, позаатмосферної астрономії, медицини, біології та інші. І третє, проблеми, пов'язані з реалізацією довготривалого пілотованого польоту.

Всі ці завдання потребують широких наукових досліджень безпосередньо на борту ОКС. Було б дуже важливим перенести найсучасніші та найкращі технології наукових досліджень, в першу чергу автоматизованих, на борт ОКС і надати космонавтам-дослідникам найкращий інструментарій.

У статті мова йтиме про пропозиції щодо створення на борту ОКС широкопрофільної автоматизованої науково-дослідної лабораторії, про її технічне, програмне, інформаційне та методичне забезпечення.

Структурно така лабораторія може складатися з кількох автоматизованих робочих місць космонавта-дослідника (АРМКД), на яких в паралельному режимі будуть виконуватись різні наукові дослідження в реальному часі. Ці робочі місця можуть

бути поєднані в загальну інформаційну мережу для створення єдиної бази даних. Всі види забезпечення АРМ КД будуть складатися з двох частин: постійної, яка постійно буде знаходитись на орбіті, і змінної, що буде доставлятися на орбіту при потребі.

Постійна частина технічного забезпечення АРМ КД включатиме в себе бортовий варіант персонального комп'ютера, обладнаного сітковим адаптером та пристроєм зв'язку з об'єктом (ПЗО).

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ПЗО ДЛЯ АРМ КОСМОНАВТА-ДОСЛІДНИКА

Зупинимось на виборі стандарту ПЗО для АРМ. З 1970 до 1990-х рр. в галузі автоматизації наукових досліджень домінував міжнародний стандарт КАМАК. Більшість науково-дослідних організацій розробляли системи автоматизації наукових досліджень в цьому стандарті. Мікромініатюризація засобів обчислювальної техніки спричинила появу персональних комп'ютерів і великої кількості стандартів ПЗО для них. Системи автоматизації почали створюватися на модулях професійної орієнтації, які вироблялись у вигляді плат для персональ-

ного комп'ютера і вмонтовувались в корпус цього комп'ютера. Складні ж системи розроблялись в магістрально-модульних багатопроцесорних системах, таких як VME та Multibus. Ряд фірм розробили свої стандарти ПЗО для автоматизації технологічних процесів та наукових досліджень. Таким чином, на сьогодні немає єдиного стандарту ПЗО для наукових досліджень. Можна тільки зазначити основні вимоги до ПЗО, який міг би бути одним із стандартів для бортової космічної науково-дослідної лабораторії. По-перше, ПЗО повинен мати невеликі габарити. По-друге, він має бути побудований за магістрально-модульним принципом і бути багатопроцесорним. Модулі ПЗО повинні легко замінюватись. Програмне забезпечення ПЗО має включати в себе тестові програми для перевірки модулів. Це лише основні, бажані пропозиції.

Вимоги до інших видів забезпечення постійної частини АРМ наступні:

- Програмне забезпечення повинно включати в себе операційну систему комп'ютера, набір трансляторів та різних службових загальносистемних програм. Одне з головних місць буде займати так звана «мова дослідника». За її допомогою космонавт-дослідник зможе швидко реконфігурувати програмне забезпечення конкретного експерименту.
- Інформаційне забезпечення повинно підтримувати єдину інформаційну базу в лабораторії і стандартизувати структуру даних та забезпечення типової схеми між АРМ, дослідницьким процесом та космонавтом-дослідником.

Узагальненість загальносистемних видів забезпечення постійної частини АРМ в рамках програми досліджень. Це дозволить забезпечити взаємозамінність цих видів забезпечення АРМ в межах усієї станції.

Технічне, програмне та методичне забезпечення для конкретного дослідницького експерименту є змінною частиною забезпечення АРМ і розробляється для кожного експерименту окремо з урахуванням вимог стандартизації.

Такі основні загальні вимоги до створення на борту ОКС довготривалої автоматизованої науково-дослідної лабораторії. Принцип уніфікації та модульності як технічного, так і програмного забезпечення АРМ закладається в ідею створення такої лабораторії. В першу чергу потрібно мати високоефективні системи для обробки даних з високою роздільною здатністю, які б мали багатофункціональне призначення і малі габарити. Такою системою для ОКС в складі бортової лабораторії пропонується інформаційний відеоскоп.

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ВІДЕОСКОП ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ З НАДВИСОКОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ

Інформаційний відеоскоп є принципово новим автоматизованим приладом для введення та подальшої обробки даних зображень різноманітної фізичної природи, в першу чергу оптичної. Ідея цього приладу полягає в наданні космонавту-досліднику новітнього пристрою для відображення результатів наукових досліджень в найбільш сприятливій для людини формі — формі телевізійних зображень.

Інформаційний відеоскоп може функціонувати в двох режимах: в режимі «on line» безпосередньо з даними, які отримуються з експерименту в реальному часі, і в режимі «in line» з інформацією, яка зберігається в базі даних.

В режимі «on line» в залежності від типу давачів інформаційний відеоскоп може збирати тривимірну інформацію в багатовимірному інформаційному просторі. При постійному значенні інших параметрів в інформаційному відеоскопі здійснюється розгортка по двох незалежних параметрах X та Y і збирається інформація про деякий параметр Z . Результати досліджень відображаються на екрані монітора комп'ютера у вигляді телевізійної картини, де параметри X та Y задають координати пікселя, а координата Z відображається його яскравістю. Таким чином, космонавт-дослідник за допомогою зорової інформації може швидко оцінювати велику кількість експериментальних даних, які містяться в одному кадрі зображення.

Параметрами, якими оперує інформаційний відеоскоп, можуть бути напруга, струм, тиск, температура, лінійні розміри і ряд інших. Найпоширеніше застосування інформаційного відеоскопа — це його використання для введення звичайних телевізійних зображень просторових об'єктів, які знаходяться на віддалі від дослідника.

Як відомо, в світі існує велика кількість різних систем введення зображень об'ємних об'єктів в комп'ютер. Здебільшого вони будуються на базі звичайних телекамер, які працюють в одному з відомих телевізійних стандартів. Ряд фірм виробляють так звані «захоплювачі кадру» у вигляді однієї плати до персонального комп'ютера. Ідеологія таких систем базується на тому, що комп'ютерне зображення формується шляхом оцифрування аналогового відеосигналу швидкодіючим аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) і запам'ятовується в пам'яті комп'ютера та відображається на екрані монітора. Цей метод дозволяє отримати комп'ютерне зображення з роздільною здатністю до 1000×1000 пікселів на один кадр зображення і 64–256 градацій яскравості одного пікселя. Такі характе-

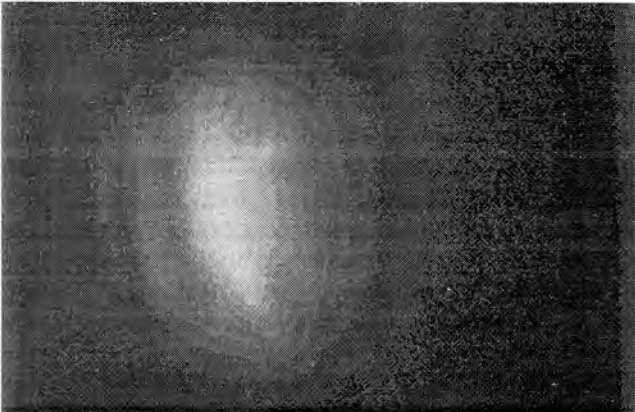
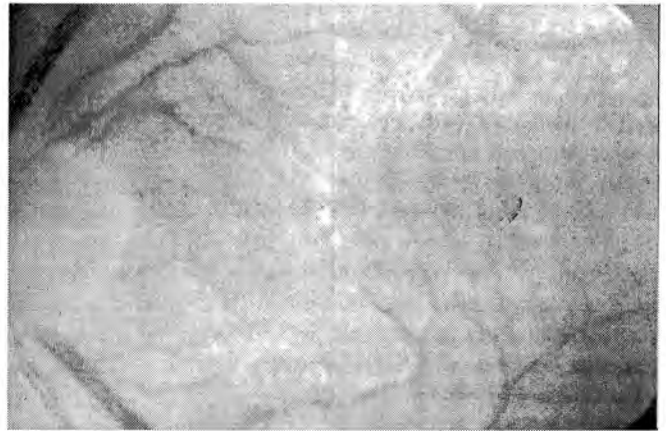
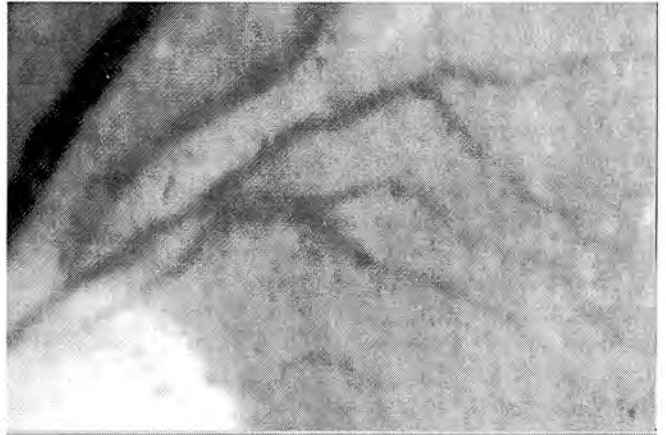
a*б**в**a**б**в*

Рис. 1. Дослідження точкових об'єктів: *a* — повна панорама, *б* — проміжний випадок, *в* — крупний план

Рис. 2. Дослідження лінійних об'єктів: *a* — повна панорама, *б* — проміжний випадок, *в* — крупний план

ристики задовольняють вимоги великої кількості якісних задач, але є дуже низькими для вимірних систем. Це стосується використання таких систем на борту ОКС для дослідження космічних об'єктів в задачах астрофізики та позаатмосферної

астрономії. Вирішення цих задач вимагає високої роздільної здатності.

Враховуючи сказане вище, пропонується інформаційний відеоскоп, який може використовуватись в лабораторії на ОКС на базі системи введення те-

левізійних зображень, побудованій за технологією програмно-керованих растрів [2]. Ця технологія введення телевізійних зображень принципово відрізняється від звичайних тим, що в телевізійній камері, яка використовується в цій системі, відсутня автономна система розгортки електронного променя. Розгортки по вертикалі та горизонталі формуються комп'ютером програмно і через два цифро-аналогових перетворювачі (ЦАП) подаються на відхиляючу систему телевізійної камери. Це дозволяє організувати зчитування інформації з мішені приймальної трубки з перекриттям пікселів і рядків. Це, в свою чергу, дає можливість зчитувати інформацію з роздільною здатністю, значно вищою, ніж площина електронного променя. Технологія програмно-керованих растрів для введення телевізійних зображень у комп'ютер дає надвисоку роздільну здатність не тільки за координатою окремого пікселя, а й за амплітудою сигналу його яскравості. Це досягається тим, що зчитування інформації з мішені телевізійної трубки проводиться не в неперервному, а в старт-стопному режимі. Більшу частину часу модулятор приймальної трубки закритий. Після «прицілювання» (подання напруг на відхиляючу систему) комп'ютер «виробляє» відкриваючий імпульс на модулятор трубки. З мішені телевізійної трубки зчитується відеоімпульс, який оцифровується піковим АЦП. Інформація з АЦП в цифровому вигляді потрапляє в комп'ютер у вигляді одного пікселя зображення. Так виконується один цикл зчитування. Цей підхід не накладає обмежень на швидкодію АЦП. Тому можна використовувати АЦП високої роздільної здатності. Визначальними при виборі АЦП будуть необхідні роздільна здатність і швидкодія, на яку накладають обмеження постійна часу телевізійної трубки і кількість пікселів в рядку. Ці параметри задають швидкодію системи в цілому.

Технологія програмно-керованих растрів має ряд переваг. Для великої кількості вимірювальних задач інформація на кадрі зображення розподілена фрагментарно. Тому нема необхідності у введенні всього кадру зображення. Технологія програмно-керованих растрів надає можливість дуже простого виділення та введення тільки необхідних фрагментів зображення. Це значно підвищує швидкодію системи.

Всі викладені переваги телевізійної системи, побудованої на технології програмно-керованих растрів, випробувано у дослідженнях для обробки складних зображень. За цією технологією була розроблена система введення телевізійних зображень надвисокої роздільної здатності для автоматизації фізичної методики «Дифракція повільних

електронів». Інформацією в цій методиці були координати і яскравості рефлексів, які висвічувались на сцинтилятивному екрані у вакуумній установці. На рис. 1 і 2 представлені реальні комп'ютерні фотографії, отримані завдяки цій системі. Наглядно показана можливість дослідження точкових і лінійних об'єктів з різним ступенем деталізації без зміни об'єктива.

На рис. 1 на прикладі дослідження рефлексів за фізичною методикою «Дифракція повільних електронів» показана можливість зміни роздільної здатності системи при дослідженні поточкових об'єктів. На рис. 1, *а* показана повна панорама зображення, яке є на мішені телевізійної трубки, на рис. 1, *в* рефлекс займає повний екран, а рис. 1, *б* — проміжний.

На рис. 2 зображені аналогічні можливості системи для дослідження лінійних об'єктів на прикладі обстеження очного дна людини.

РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ВІДЕОСКОПА І ЙОГО МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ КОСМІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Система введення зображень надвисокої роздільної здатності була реалізована на базі автоматизованого робочого місця експериментатора, яке було побудоване на персональному комп'ютері і апаратурі КАМАК [1]. Для формування розгортки використовувались 15-розрядні двійкові ЦАП. Відеосигнал оцифровувався 11-розрядним АЦП. Це надало можливість проводити за допомогою цієї системи лінійні вимірювання з відносною похибкою 0.003 % та вимірювання інтенсивності сигналу яскравості з похибкою 0.05 %. Програмне забезпечення системи дозволяє вводити інформацію з мішені приймальної трубки в багатовіконному режимі. Система може працювати як комп'ютерний фотоапарат або цифровий різношвидкісний відеоманітофон, при цьому кількість кадрів в відеофільмі визначається розміром пам'яті комп'ютера та розміром і кількістю підкадрів. Надається можливість продивлятися порядкові графіки зображень як у покроковому, так і у динамічному режимах в прямому і зворотному напрямках. Закладена можливість псевдофарбування, мікрометрії та оцінка інтенсивності окремого пікселя. Для бортових космічних досліджень на ОКС реалізацію інформаційного відеоскопа можна здійснити на основі сучасної елементної бази.

Таким чином, в основу інформаційного відеоскопа закладається телевізійна система введення зображень надвисокої роздільної здатності, яка

пройшла перевірку в наземних умовах. В залежності від оптичного приладу, який буде використовуватись на борту ОКС, інформаційний відеоскоп виступатиме у вигляді цифрового фотоапарата, відеоманітофона, телескопа або мікроскопа. Заміною систем розгортки і давачів відеоскоп може бути використаний як електронний, тунельний, фотоакустичний мікроскоп або тепловізор. За його допомогою можуть бути проведені астрофізичні, біологічні, медичні та ряд інших експериментів. Космонавт-дослідник зможе проводити автоматизовані дослідження в позаатмосферній астрономії, він стане незамінним приладом в космічній навігації. За його допомогою можна буде проводити автоматизований моніторинг земної поверхні з надвисокою роздільною здатністю для обробки зображень.

Таким чином, космонавт-дослідник отримає принципово новий високоефективний сучасний прилад.

1. Чинок В. М. Модуль связи с системой КАМАК для профессиональных ПЭВМ ЕС ЭВМ // Механиз. и автоматиз. упр. Науч.-произв. сб. — 1988. — № 4. — С. 35—37.
2. Чинок В., Віхлій О., Конончук С. та ін. Программовані растри в системах введення зображень фізичних об'єктів // Обробка сигналів та зображень та розпізнавання образів: Праці 1 Всеукр. конф. — Київ, 1992. — С. 181—182.

INFORMATION VISION SYSTEM — A BASIC ELEMENT OF AN AUTOMATED WORKING PLACE FOR ASTRONAUT RESEARCHERS

V. M. Chynok

The information vision system — a multipurpose device for the automation of space research is proposed. The sphere of its application and the range of its modifications are described.

УДК 621.396.965.8

Про один підхід до підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень у космічних дослідженнях

О. І. Коваль, Р. Я. Косаревич, Б. П. Русин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 22.01.98

Представлені результати застосування ітераційного методу відновлення складноструктурованих зображень (реальних знімків земної поверхні з космосу) з метою підвищення їх роздільної здатності. Досліджено вплив параметра β на результати обробки. Показана необхідність компромісного вибору величини β та кількості кроків обробки.

ВСТУП

Питання підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень стоїть досить гостро, оскільки далеко не всі користувачі на сьогодні задоволені тією якістю відтворення інформації, яку можуть забезпечити сучасні системи запису візуальної інформації, в тому числі бортові скануючі системи [1].

Інтенсивне дослідження і освоєння природних ресурсів Землі ставить перед дистанційними методами проблему отримання інформації з характеристиками, досягнення яких пов'язані із значними технічними труднощами. Особливо високі вимоги до роздільної здатності інформації в таких областях, як будівництво міст, впорядкування лісових угідь, сільське господарство, контроль забруднень навколишнього середовища, тощо. Окремі задачі вимагають отримання даних про просторову структуру природних об'єктів, розміри яких становлять 3–5 м, тобто знімки земної поверхні повинні мати високу якість. Ця якість буде визначатися ступенем інформативності отриманих зображень, тобто мінімальною деталлю об'єкта, яку можна ідентифікувати на зображенні.

Роздільна здатність скануючих систем з таких міркувань повинна бути якнайвищою. На сьогоднішній день існує два підходи до її підвищення. Перший — апаратний, полягає в збільшенні діаметра дзеркала сканера d (рис. 1), що спричиняє збільшення габаритів, маси установки і супутника в цілому, а значить збільшує його вартість. Другий — програмний, який прагне розв'язати проблему методом математичних перетворень, що спрямовані на компенсацію спотворень зображення в процесі його формування. Як правило, спотворення викликані впливом турбулентності атмосфери, які можна розглядати як внесення додаткового розфокусування оптичної системи, що спричиняє появу розмиття на фотознімку.

На сьогодні відомі різні підходи до покращення візуального сприйняття зображень, які спотворені розмиттям. Ситуація ускладнюється ще й наявністю шумових складових, джерелами яких є як внутрішні (вузли та блоки реєструючої апаратури), так і зовнішні фактори. Найбільш відомим підходом до покращення якості такого класу зображень є інверсна фільтрація, а також застосування фільтра Вілера, фільтра на основі методу найменших квадратів [7], що використовують двовимірне перетво-

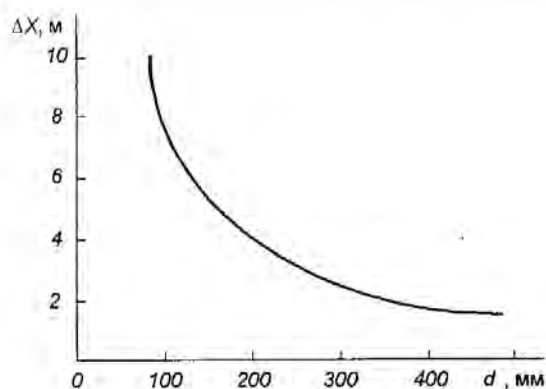


Рис. 1. Залежність роздільної здатності сучасних сканерів ΔX від діаметра дзеркала d

рення Фур'є. Для боротьби з розмиттям можна використовувати і регуляризацию Тихонова-Міллера як метод розв'язку некоректних задач [5].

ДЕЯКІ МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, СПОТВОРЕНИХ РОЗМИТТЯМ

Розглянемо вищезгадані методи більш детально, зосередивши свою увагу на відновленні розфокусованого зображення при наявності шумів.

Застосування інверсної фільтрації. Як відомо, інверсний фільтр являє собою лінійний фільтр, передаточна характеристика якого h_{inv} обернена до функції розсіювання точки (ФРТ) h в сенсі

$$h_{\text{inv}} h = \delta,$$

де δ — дельта-функція Дірака.

Переходячи в частотну область, маємо

$$H H_{\text{inv}} = 1.$$

Дискретне представлення спотвореного зображення на виході інверсного фільтра визначається виразом:

$$F_n(m, n) = F(m, n) + H_{\text{inv}} N(m, n),$$

де $F_n(m, n)$, $F(m, n)$ — дискретизовані відповідно вихідне зображення та оригінал; $N(m, n)$ — дискретизований шум.

Таким чином, на виході інверсного фільтра маємо адитивну суміш оригіналу та підсиленого ним шуму.

Основними недоліками даного підходу є:

- а) H_{inv} не існує у випадках, коли $H \rightarrow 0$;
- б) факт широкопasmовості шуму ускладнює про-

цес відновлення через підсилення його високочастотних складових в H_{inv} разів [2].

Фільтр Вінера і метод найменших квадратів. Для усунення чутливості інверсної фільтрації до наявності шуму у спотвореному зображенні було розроблено кілька типів фільтрів, найвідомішими серед яких є фільтр Вінера та розв'язок методом найменших квадратів. Фільтр Вінера являє собою інваріантний лінійний фільтр, в якому надмірне підсилення шуму зменшується введенням в процес відновлення інформації про спектральні складові густини потужності зображення та шуму. Частотна характеристика такого фільтра вибирається з міркувань мінімізації середньої квадратичної похибки відновлення. Розв'язок цієї задачі подається у вигляді

$$H_n(m, n) = H^*(m, n) / [|H(m, n)|^2 + S_n(m, n) / S_s(m, n)], \quad (1)$$

де $H_n(m, n)$ — дискретна частотна характеристика фільтра Вінера; $S_n(m, n)$, $S_s(m, n)$ — спектральні густини потужності відповідно шуму та сигналу; H^* — комплексно-спряжена величина. Бачимо, що при відсутності шуму фільтрація Вінера зводиться до псевдоінверсної. Недоліком даного методу відновлення є в основному боротьба лише з шумом без усунення розмиття. До подібних результатів веде і використання методу найменших квадратів.

Метод регуляризації Тихонова-Міллера. Широко відомим шляхом боротьби з впливом високочастотних шумових складових, які зменшують стійкість шуканого розв'язку, є застосування методу регуляризації Тихонова-Міллера, який полягає в мінімізації на множині розв'язків, які відповідають оригіналу зображення, стабілізуючого функціоналу у вигляді

$$\Omega(f) = Cf,$$

де f — оригінал зображення; C — матричний оператор, який називають регуляризуючим.

Характеристика відновлюючого фільтра тоді має вигляд:

$$H_p = H^* / [HH^* + \alpha CC^*],$$

де α — параметр регуляризації.

Однак даний метод вносить деяку невизначеність, бо не існує чіткого критерію вибору стабілізуючого функціоналу, у зв'язку з чим множина розв'язків залишається надто широкою.

Виходячи з наведених вище міркувань, в даній роботі зроблена спроба підвищення роздільної здатності складноструктурованих зображень з використанням ітераційного підходу [2].

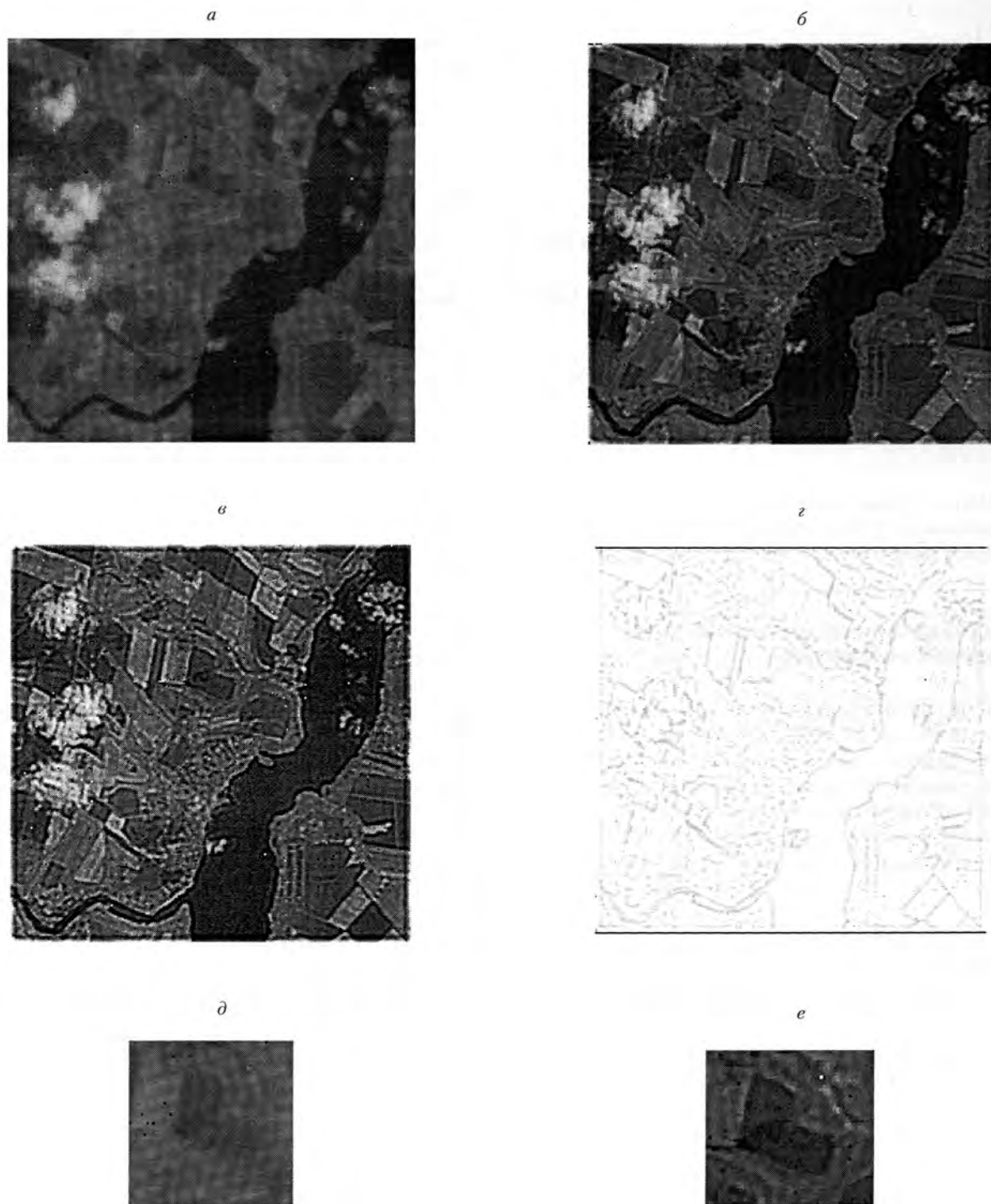


Рис. 2. Результати обробки зображення «річка» алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта: *a* — вхідне зображення; *б* — результуюче зображення (3 ітерації); *в* — результуюче зображення (7 ітерацій); *г* — різницеве зображення (*б* та *а*) в інверсних кольорах; *д* — розмита область на вихідному зображенні; *е* — результат обробки розмитої області

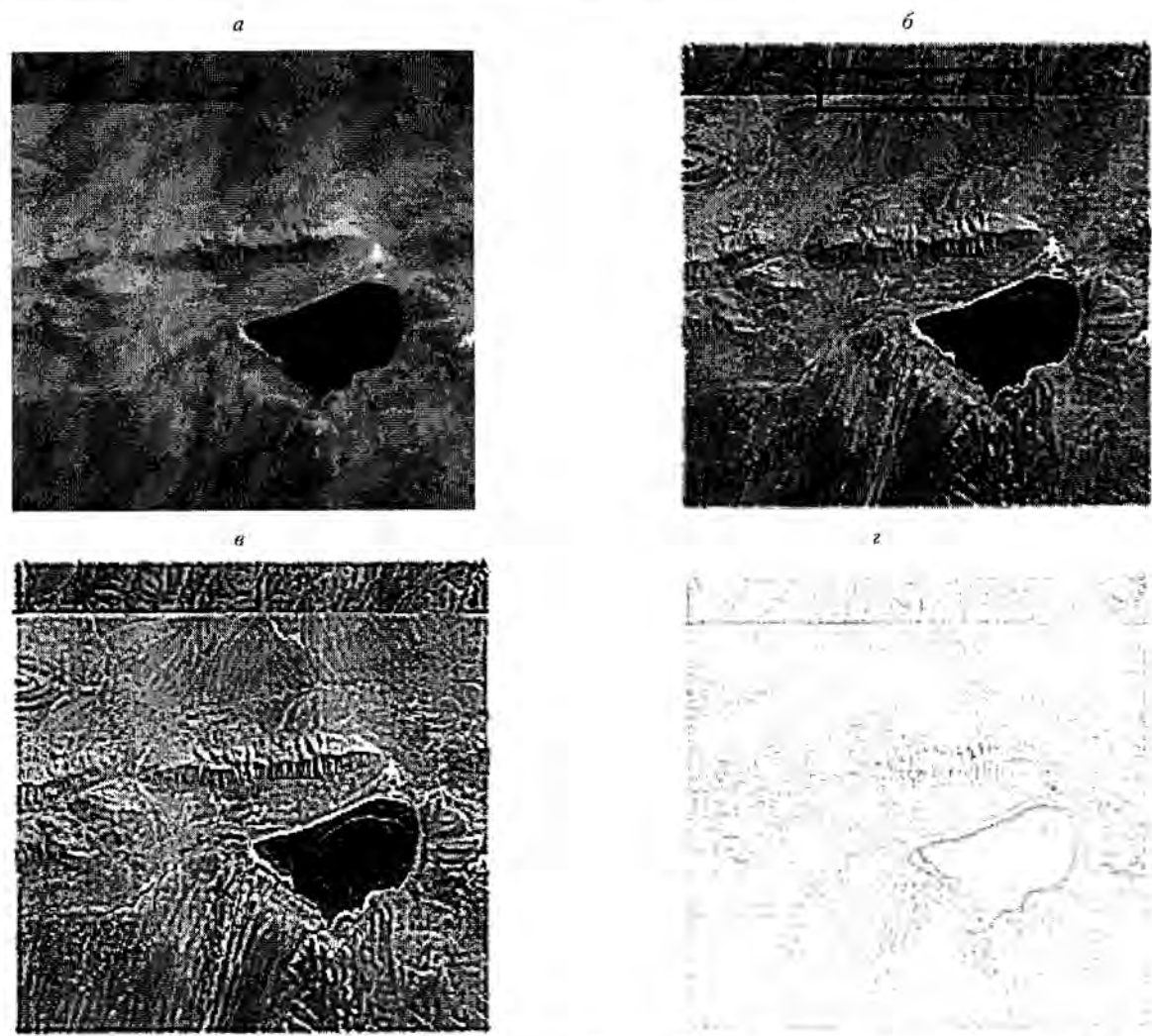


Рис. 3. Результати обробки зображення «поверхня» алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта: *a* – вхідне зображення; *б* – результуюче зображення (3 ітерації); *в* – результуюче зображення (7 ітерації); *г* – різницеве зображення (*б* та *а*) в інверсних кольорах

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Як відомо, розмиття проявляє себе у вигляді низькочастотної фільтрації зображення, що суттєво спотворює його високочастотні складові. Тому існує можливість підвищення інформативності зображення шляхом усунення наслідків впливу турбулентності атмосфери. Механізм розмиття зображення, яке описується функцією $f(x, y)$, можна визначити згорткою:

$$g(x, y) = H(x, y) \circ f(x, y),$$

де $g(x, y)$ – результуюче розмите зображення; $H(x, y)$ – імпульсна передаточна характеристика спотворюючої оптичної системи або ФРТ (в цифровій формі H – матриця $n \times n$ пікселів, а $n = 2R + 1$, де R – радіус ФРТ).

МЕТОД РОЗВ'ЯЗКУ

Серед багатьох методів відновлення розмитих зображень найбільш перспективними вважаються ітераційні, які будуються на основі процедури, що носить назву Бургера – Ван-Циттерта [3]:

$$f_{k+1} = g + \beta f_k (I - H),$$

де β – параметр обробки, який визначає швидкість збіжності алгоритму; I – одиничний оператор; k – номер кроку ітерації.

Будь-який ітераційний алгоритм потребує відповіді на два важливих питання: чи збіжний він, і якщо так, то до якого граничного розв'язку. Шляхом прямих обчислень одержуємо [2]:

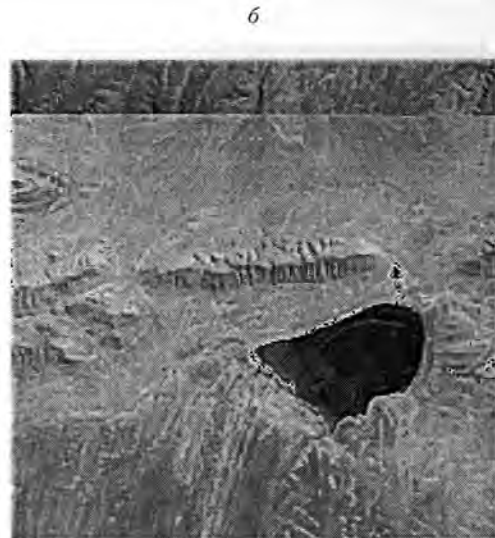
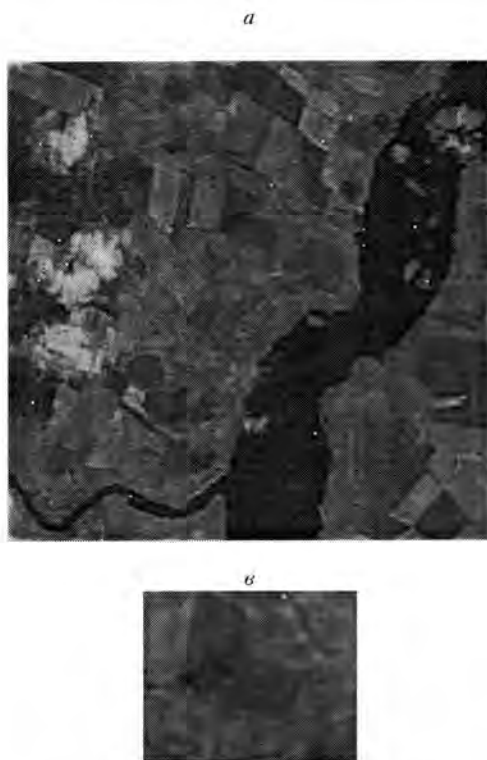


Рис. 4. Результати обробки зображень «поверхня», «річка» та розмитій області (рис. 1, д) алгоритмом Бургера–Ван-Циттерта при зменшеному коефіцієнті обробки ($\beta = 0.55$) після 75 ітерацій

$$f_k = \sum_{r=0}^k \mathbf{G}^r g, \quad (2)$$

де $\mathbf{G} = \beta(\mathbf{I} - \mathbf{H})$.

Якщо матриці $(\mathbf{I} - \mathbf{G})$ та $\mathbf{H}$ мають до себе обернені, то вираз (2) можна записати у вигляді

$$f_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1}(\mathbf{I} - \mathbf{G}^{k+1})g.$$

При існуванні границі

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{G}^{k+1} g = 0,$$

що є достатньою умовою збіжності алгоритму Бургера–Ван-Циттерта, розв'язок (1) має вигляд

$$f_{\infty} = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1} g = \mathbf{H}^{-1} g. \quad (3)$$

Цей розв'язок являє собою інверсний фільтр.

Однак його ітераційна реалізація є кращою від прямої (3), бо з'являється можливість керування підсиленням шумів і відпадає необхідність знаходження зворотного оператора.

Слід також відзначити наступну особливість реалізації оператора розмиття $\mathbf{H}(x, y)$. Із міркувань виконання закону збереження енергії приймається:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mathbf{H}_{ij} = 1. \quad (4)$$

На основі перерахованих вище міркувань з урахуванням особливості виразу (4) запропоновано алгоритм [4]. Він був застосований до реальних зображень земної поверхні, отриманих на борту

ШСЗ «Ресурс» з роздільною здатністю 20 м/піксель), умовно названих «поверхня» та «річка». Результати обробки зображень ілюструються рис. 2 і 3.

Отримані в ході обробки результати показали, що їх достовірність суттєво залежить від кількості ітерацій та величини кроку ітерації.

На рис. 2, б, в наведені результати обробки зображення «річка» після відповідно трьох та семи кроків виконання алгоритму і при значенні коефіцієнта обробки $\beta = 1$.

Стає очевидним той факт, що навіть таке невелике збільшення числа ітерацій призводить до появи на зображенні хибної інформації (артефактів). Це викликано локальними різкими перепадами яскравості (типу одиничного стрибка) на вхідному зображенні (рис. 2, а), що проявляється на результатуючому у вигляді хибних осциляцій яскравості, незважаючи навіть на те, що для послаблення цього ефекту приймається умова додатності значень яскравості, тобто $f_{k+1} \geq 0$ [6].

Використання в процесі роботи алгоритму значення коефіцієнта $\beta < 1$ (в нашому випадку $\beta = 0.55$) дозволяє досягнути зменшення впливу вказаного вище недоліку (рис. 4, а). Однак зменшення величини кроку відновлення викликає погіршення результатів з точки зору ідентифікації деталей об'єктів на зображенні (рис. 4, в).

Аналогічні результати одержано також для зображення «поверхня», що представлено на рис. 3 і 4, б. Хибні яскравісні осциляції показані виділенням на рис. 2, б.

ВИСНОВКИ

- 1. В результаті застосування алгоритму Бурге-ра-Ван-Циттерта є очевидним підвищення чіткості вхідних зображень та їх окремих деталей, що викликано розширенням їх динамічного діапазону.
- 2. Суцільна розмита область на рис. 2, д була зведена до чіткого контура, який легко піддається ідентифікації (рис. 2, е).
- 3. Наявність різких локальних перепадів яркості ускладнює питання ідентифікації деталей наявою артефактів на зображенні, що викликає необхідність знаходження компромісного рішення про кількість ітерацій обробки і величини їх кроку.

- 1. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. — М.: Мир, 1989. — 336 с.
- 2. Бьемон Ж., Лагендейк Л., Мерсеро Р. М. Итерационные методы улучшения изображений // ТИИЭР. — 1990. — 78, № 5. — С. 58—84.

- 3. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
- 4. Коваль О. І., Косареви́ч Р. Я., Русин Б. П., Кобевко Д. Г. Підвищення роздільної здатності космоаерофотографічних зображень // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі: Третя міжнар. науково-практична конф. — Житомир, 1997. — С. 26—28.
- 5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
- 6. Шафер Р. У., Мерсеро Р. М., Ричарде М. А. Итерационные алгоритмы восстановления сигналов при наличии ограничений // ТИИЭР. — 1981. — 69, № 4. — С. 34—55.
- 7. Andrews H. C., Hunt B. R. Digital Image Restoration. — Englewood Cliffs. — New York: Prentice-Hall, 1977.

ONE MORE APPROACH TO THE IMPROVEMENT OF RESOLUTION OF COMPLEX-STRUCTURED IMAGES

O. I. Koval, R. Ya. Kosarevych, and B. P. Rusyn

The iterative method of restoration of complex-structured images was applied to actual space images of the Earth surface with the aim to improve their resolution. The effect of the parameter β on the processing result was studied. We demonstrate that a compromise should be made between the choice of the parameter β and the number of processing steps.

УДК 621.396.965.8

Апроксимація контурів образів для їх класифікації при дистанційному зондуванні Землі

Р. Я. Косаревич

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 22.01.98

Розроблено спосіб опису контурів зображень, отриманих в результаті дистанційного зондування Землі. Показано інваріантні властивості такого опису до афінних перетворень та перетворення подібності ознакового простору. Побудовано алгоритм класифікації контурів на основі цього опису.

ВСТУП

З початку 1970-х років нашого століття дистанційне зондування Землі стало швидко розвиватися як єдиний багатодисциплінарний напрямок досліджень в науці і практиці. Засноване більш ніж на піввіковому досвіді аерофотозйомки і тематичному використанні її результатів, воно застосовується сьогодні при розв'язку багатьох задач геології, в тому числі при пошуках в розвідці родовищ корисних копалин і підземних вод, в географії, в лісовому і сільському господарстві, океанології і океанографії, при плануванні місцевості під будівництво. Неперервно збільшується його роль при розв'язку екологічних проблем [1].

Результати дистанційного зондування земної поверхні у вигляді зображень можуть аналізуватися як людиною, так і за допомогою ЕОМ. Перевага людини в тому, що часто навіть за неповною інформацією вона може зробити правильний висновок. Перевага ЕОМ в швидкодії, можливості використання в різних середовищах, використанні протягом довільного проміжку часу, тобто в економічності. Все більше створюються автоматичні системи розпізнавання, де не використовується експер-

том людина. Але для ЕОМ потрібні численні алгоритми, завдяки яким вона зможе аналізувати зображення, тобто математична модель розпізнаючої системи. Образи природних і штучних об'єктів суттєво відрізняються. Очевидно, що для їх опису потрібно використовувати різні методи, як аналітичні, так і структурно-синтаксичні. Крім того, не завжди відомо, який з методів дасть кращі результати. Основною відмінністю структурно-синтаксичного розпізнавання є безпосереднє використання структури об'єктів як в процесі дослідження і формування ознак, так і класифікації [3]. В загальному випадку в результаті синтаксичного аналізу повинні бути визначені елементарні компоненти (непохідні елементи), з яких будується об'єкт, образ якого задається як деяке зображення. Аналітичні методи в загальному випадку відрізняються строго кількісним підходом до об'єктів, тобто об'єкт описується вектором чисел. При цьому майже повністю ігноруються взаємозв'язки між компонентами об'єкта.

В роботі пропонується метод формування ієрархічної структури ознак об'єкта, які описують як структуру об'єкта, так і кількісно виражають його характеристики.

ФОРМУВАННЯ ОПИСУ КОНТУРА ОБЛАСТІ

Пропонований метод формування опису полягає у поєднанні характеристик форми частини контура області з їх кількісною оцінкою. Аналіз форми областей являє собою одну з основних задач розпізнавання образів. Можна виділити два підходи до розпізнавання форми областей. При використанні першого людина розглядає область в цілому і приймає рішення, виходячи з її загальної структури. При другому підході досліджується контур області: шукаються кути, виступи, впадини та інші точки з високим значенням кривизни в них [2]. Оскільки існує взаємно однозначна відповідність між контуром області та самою областю, то скористаємось другим підходом.

Проаналізуємо контур C області $A \in R^2$ і спробуємо представити контур C як конкатенацію зручних для кількісного опису елементів, а саме відрізків прямих, дуг кіл та дуг еліпсів. Розпочнемо з визначення точок контура з високим значенням кривизни в них (назвемо їх екстремальними). До таких будуть належати точки, координати яких задовольняють одну з умов:

$$\begin{aligned} &x_{i-k} < x_i > x_{i+k} \vee y_{i-k} < y_i > y_{i+k}, \\ &x_{i-k} \leq x_i > x_{i+k} \vee y_{i-k} \leq y_i > y_{i+k}, \\ &x_{i-k} < x_i \geq x_{i+k} \vee y_{i-k} < y_i \geq y_{i+k}, \\ &x_{i-k} > x_i < x_{i+k} \vee y_{i-k} > y_i < y_{i+k}, \\ &x_{i-k} \geq x_i < x_{i+k} \vee y_{i-k} \geq y_i < y_{i+k}, \\ &x_{i-k} > x_i \leq x_{i+k} \vee y_{i-k} > y_i \leq y_{i+k}, \end{aligned} \tag{1}$$

де величина k визначає окіл екстремальної точки. В результаті виділення екстремальних точок контура можемо вважати його розбитим на частини, які містяться між цими точками (рис. 1). Ці частини становитимуть непокідні елементи контура.

Припущення. Контур C довільної області A можна інтерполювати відрізками прямих, дугами кола, дугами еліпса.

На основі цього припущення кожену частину контура C будемо інтерполювати відрізком прямої або дугою кола чи еліпса. Розглянемо довільну частину контура C , вона обмежена екстремальними точками і має вигляд дуги або відрізка прямої. Визначимо рівняння дотичних, що проходять через екстремальні точки частини контура. Для побудови рівняння використаємо сусідні з екстремальними точки. Якщо рівняння однакові, то частина контура – відрізок прямої. Якщо рівняння різні, то до кожної дотичної будемо перпендикуляр і знаходимо точку перетину цих перпендикулярів. Якщо

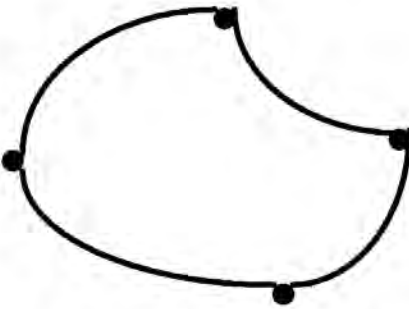


Рис. 1. Результат виділення екстремальних точок контура

відстані від точки перетину до екстремальних точок однакові, то вважаємо, що частина контура – дуга кола, а відстані від точки перетину до екстремальної точки є радіусом (рис. 2, *a*). Якщо відстані від точки перетину до екстремальних точок різні, тоді визначимо величину кута між перпендикулярами. Якщо кут прямий, то вважаємо, що частина контура – дуга еліпса, а відстані від точки перетину перпендикулярів до екстремальних точок – мала та велика півосі еліпса (рис. 2, *б*). Якщо кут між перпендикулярами не прямий, то за його величиною, можна визначити малу та велику півосі еліпса із його параметричного рівняння.

Якщо позначити відрізок прямої через l , дугу кола через c , дугу еліпса через e , тоді контур області можна поставити у відповідність деяку послідовність символів l, c, e .

Розглянемо випадок афінного перетворення контура C області A . При паралельному переносі області A координати всіх контурних точок змінюються на деяку константу g_1 для координати x та деяку константу g_2 для координати y (g_1 та g_2 – величини переносу). Геометрична форма контура при цьому не змінюється, положення на контурі екстремальних точок контура не змінюється теж, тому послідовність із символів l, c, e не змінюється та

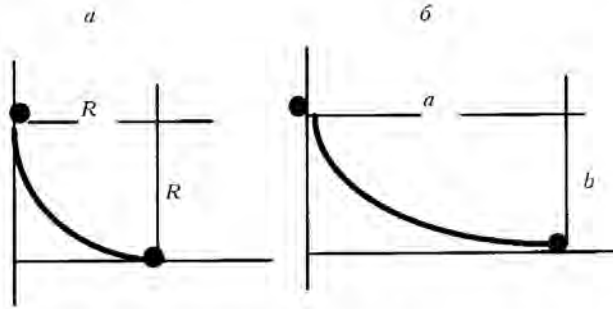


Рис. 2. Частина контура: *a* – дуга кола, *б* – дуга еліпса

кож. При повороті на деякий кут α координати контура **C** області **A** зміняться відносно старих за формулами

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \alpha + y \sin \alpha, \\y' &= -x \sin \alpha + y \cos \alpha,\end{aligned}\quad (2)$$

де x, y — старі координати. Якщо у вираз (2) підставити параметричне рівняння дуги кола радіуса R :

$$\begin{aligned}x &= R \cos \varphi, \\y &= R \sin \varphi, \\t_1 &\leq \varphi \leq t_2,\end{aligned}\quad (3)$$

то отримаємо параметричне рівняння

$$\begin{aligned}x &= R \cos(\varphi + \alpha), \\y &= R \sin(\varphi + \alpha), \\t_1 + \alpha &\leq \varphi + \alpha \leq t_2 + \alpha,\end{aligned}$$

яке є рівнянням дуги кола радіуса R , повернутої на кут α .

Для рівняння прямої

$$Ax + By + C = 0 \quad (4)$$

підстановка формул (2) дає рівняння

$$(A \cos \alpha - B \sin \alpha)x + (A \sin \alpha + B \cos \alpha)y + C = 0,$$

яке теж є рівнянням прямої. Оскільки при ортогональних перетвореннях кути між векторами зберігаються, то дуга еліпса не зміниться при цьому перетворенні. Отже, поворот на кут α контура **C** не змінить послідовність із символів l, c, e .

При перетворенні подібності координати контура **C** області **A** зміняться відносно старих за формулами:

$$\begin{cases}x' = e_1 x, \\y' = e_2 y,\end{cases}$$

де e_1, e_2 — масштабні множники. При такому перетворенні рівняння (3) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned}x &= e_1 R \cos \varphi, \\y &= e_2 R \sin \varphi, \\t_1 &\leq \varphi \leq t_2,\end{aligned}$$

яке є рівнянням кола, а рівняння прямої (4) набере вигляду

$$Ae_1 x + Be_2 y + C = 0.$$

Рівняння еліпса зведеться до

$$\frac{e_1^2 x^2}{a^2} + \frac{e_2^2 y^2}{b^2} = 1.$$

Видно, що за такого перетворення змінюється лише довжина сегмента прямої, радіус дуги кола і величини півосей еліпса.

Отже, можемо вважати, що послідовність із символів l, c, e описує контур **C** деякої області **A**. Для однозначної відповідності потрібно враховувати величини відрізків прямих та дуг кіл і еліпсів.

Для того щоб можна було однозначно поставити у відповідність контуру **C** області **A** деяку послідовність символів l, c, e і щоб з цієї послідовності можна було відтворити область **A**, необхідно для кожного елемента послідовності визначити величини, достатні для його відтворення. Для відрізка прямої такими величинами будуть координати крайніх точок. Для дуги кола необхідно визначити: координати центра, радіус дуги, початковий та кінцевий кути. Для дуги еліпса достатньо визначити: координати центра, початковий та кінцевий кути, величини великої та малих півосей еліпса. Всі ці величини легко визначаються на етапі інтерполявання частин контура **C** області **A**.

КЛАСИФІКАЦІЯ

Задача класифікації по суті являє собою задачу розбиття простору ознак на області, по одній для кожного класу. Розбиття це потрібно проводити так, щоб було якомога менше помилкових рішень.

Нехай маємо об'єкти, які належать до різних класів. Для кожного класу сформовано вектор ознак **X**, і вхідний об'єкт також представлений вектором ознак. Потрібно визначити до якого класу віднести вхідний об'єкт порівнюючи вектори ознак. Вектор ознак **X** складається із послідовності символів l, c, e та величин, що їх описують. Процес класифікації в такому випадку складатиметься з двох етапів. Нехай маємо деяку вхідну послідовність $lccellcel$ та M класів об'єктів. Класи формуватимемо за кількістю елементів послідовності, що описує контур області. Наприклад, клас-5 об'єднує об'єкти, опис контура яких складається з п'яти елементів. За таким поділом в класі- n можна виділити n^3 комбінацій з символів l, c, e . На першому етапі порівнюємо вхідну послідовність, її довжину, порядок символів, частоту кожного символу із послідовністю класу, що описує деякий об'єкт. Перший етап послідовно проводимо зі всіма послідовностями, що описують відомі об'єкти. На цьому етапі вхідну послідовність однозначно можна вва-

жати певідповідною до послідовності, що описує відомий об'єкт лише у випадку невідповідності довжин послідовностей. Для того щоб процес порівняння послідовностей проходив швидше, можна вибрати із послідовності символ деякого типу, наприклад *l*, за головний і порівнювати послідовності після того, коли вони перетворені так, що в обох символ *l* стоїть на першому місці.

Якщо на першому етапі отримаємо збіг послідовностей, то переходимо до другого етапу, на якому перевіряємо величини, що описують елементи послідовності. Можливі наступні випадки:

- величини збігаються, тоді вхідна послідовність описує відомий об'єкт;
- величини відрізняються на деякий множник, тоді вхідна послідовність описує відомий об'єкт у зміненому масштабі.

ВИСНОВКИ

Задачі дистанційного зондування Землі вимагають ефективних алгоритмів обробки даних, результатом якої має бути отримання достовірної інформації конкретним споживачем. Потрібні такі системи ознак образу, одержання яких не вимагало б значних затрат апаратних ресурсів і часу.

Саме така система ознак наведена в даній роботі. Всі дії щодо визначення точок з високим значенням кривизни в них та наступні дії щодо форму-

вання частин контура проводяться з масивами даних, не використовуючи зображення, що суттєво економить час роботи. Запропонована система ознак є інваріантною до афінних перетворень простору зображень, однозначна відповідність між об'єктом і ознаковим простором дозволяє класифікувати об'єкти з високою достовірністю. Запропонований підхід дає можливість формувати ознаки для об'єктів, що мають складну геометрію контура.

1. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. — М.: Мир, 1988. — 350 с.
2. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.
3. Русын Б. П. Структурно-лингвистические методы распознавания изображений в реальном времени. — Киев: Наук. думка, 1986. — 128 с.

APPROXIMATION OF IMAGE BOUNDARIES FOR THEIR CLASSIFICATION IN THE REMOTE SENSING OF THE EARTH

R. Ya. Kosarevych

Boundaries of two-dimensional objects are divided into segments, each being a straight line or an arc. Characteristics of each segment which can be used for the recognition of the object are specified. An algorithm is proposed for a formal description and classification of connected areas. A criterion is suggested for the of recognition objects it is based on the boundary structure analysis.

УДК 621.373.826 + (535.373)

Сучасний стан використання лазерної технології в системах космічного зв'язку, локації та екологічного моніторингу

Д. Я. Яцків

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 10.04.98

Дається огляд сучасного стану розвитку трьох напрямків використання лазерної технології: космічний зв'язок, лазерна локація і екологічний моніторинг. Коротко описані методики виконання експериментів та характеристики існуючих приладів.

1. ЛАЗЕРНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

Можливість використання лазерного променя для зв'язку через атмосферу спочатку викликала великий ентузіазм, оскільки здавалося, що лазери матимуть дві важливих переваги:

1. Широку смугу частот. Дійсно, відомо, що кількість інформації, що може бути передана на даній базовій хвилі, пропорційна ширині її смуги. Якщо перейти від мікрохвиль до оптичних частот, ширина смуги збільшується в 10^4 разів.

2. Дуже короткі довжини хвиль випромінювання. Типова довжина хвилі випромінювання лазера приблизно в 10^4 разів менша від довжини хвилі мікрохвильового діапазону. Як видно з виразу для розбіжності випромінювання ($\alpha_d = 1.22 \frac{\lambda}{D}$, D —

діаметр променя на виході передавача), для однакової апертури розбіжність оптичних хвиль в 10^4 менша, ніж для мікрохвиль. Тому для отримання однієї і тієї ж розбіжності променя антена оптичної системи (дзеркало або лінза) матиме набагато менші розміри.

Однак обидві ці переваги стають неістотними через те, що світлові промені сильно згасають в атмосфері (особливо при погіршенні погодних умов).

Тому лазери для зв'язку у відкритому просторі (без оптичних хвилеводів) можуть бути використані тільки у двох конкретних випадках: для зв'язку в космосі і для зв'язку на коротких відстанях [2].

Для наземного зв'язку на великі відстані найсучаснішими є лазерні системи з передачею інформації оптичними хвилеводами, причому розвиток систем модуляції і демодуляції призвів до появи нових методів передачі телевізійної і об'ємної інформації [4]. Завдяки унікальним можливостям за шириною смуги пропускання, стабільністю і завадозахищеністю, оптоволоконні лінії зв'язку фактично стали одними з найперспективніших напрямків розвитку комунікацій наземного зв'язку.

Для швидкісного і оперативного зв'язку на короткі відстані найпоширенішими і розвинутими є радіотехнічні методи. Лазерний зв'язок набув поширення в тих сферах, що потребують захисту від стороннього втручання, зокрема у військових комунікаціях. Схематичне рішення для таких систем базується на комбінуванні приладів нічного бачення з прийнятно-передавальним оптичним трактом. Передавальна частина використовує компактний напівпровідниковий лазер з системою модуляції і колімуючу оптику. Зв'язок працює за принципами інтеркому. Наприклад, розроблений в лабораторії

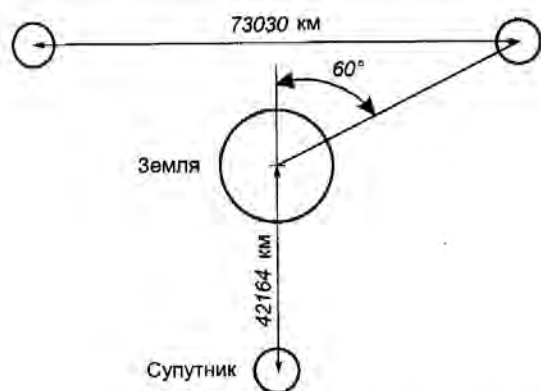


Рис. 1. Схема розміщення супутників з синхронними (24-год) орбітами

ВПС США [9] прилад, може забезпечувати двосторонній зв'язок на віддаль до 2 км протягом 4 год з наступною підзарядкою малогабаритного дев'ятивольтового блоку живлення. Такого роду система забезпечує абсолютний захист від сторонніх спостерігачів і секретність комунікації.

Окрема і дуже важлива галузь сучасного зв'язку – зв'язок в космосі між супутниками. Але для космічного зв'язку, окрім суто науково – технічних проблем, існують і технологічні обмеження. Це, перш за все, обмеження на масу і споживчу потужність пристроїв, що виводяться у космічний простір. Для якісної оцінки необхідної споживчої потужності лазерної системи зв'язку розглянемо ситуацію, типову для трьох синхронних супутників зв'язку, що мають можливість приймати і передавати лазерне випромінювання (рис. 1).

Для розрахунку зафіксуємо початкові умови: 1. Лазерний передавач на базі YAG:Nd^{3+} з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 532$ нм, що забезпечує високу квантову ефективність фотоселектронного помножувача (ФЕП). 2. Детектування сигналу здійснюється за допомогою ФЕП у відсорежимі. 3. Модуляція оптичного сигналу здійснюється за допомогою електрооптичного модулятора з шириною смуги 10^9 Гц і центральною частотою $3 \cdot 10^9$ Гц. 4. Вихідна лінза передавача і вхідна лінзи приймача мають радіуси 10 см. 5. Відношення сигнал/шум на виході підсилювача після ФЕП повинно бути 10^3 .

Оцінимо потужність передавача, розміщеного на супутнику. Спочатку запишемо рівняння, що пов'язує потужності прийому і передачі сигналу в залежності від діаметрів приймально-передавальної апертури, а також від відстані R між передавачем і приймачем.

Якщо оптичний сигнал потужністю P_T передається в просторовому куті Ω_T і якщо приймальна апертура забезпечує просторовий кут зору Ω_R , то потужність, що приймається, дорівнює

$$P_R = P_T (\Omega_R / \Omega_T). \quad (1)$$

Оптичний промінь, що приймається, дифрагує з кутом розбіжності θ , як показано на рис. 2. Цей кут пов'язаний з мінімальним радіусом променя a_0 наближеним рівнянням [2]:

$$\theta = \lambda / (\pi a_0). \quad (2)$$

Відповідний просторовий кут зору $\Omega_T = \pi \theta^2$. Якщо прийняти a_0 рівним радіусу a_T передаючої лінзи, то

$$\Omega_T = \lambda^2 \pi a_T^{-2}. \quad (3)$$

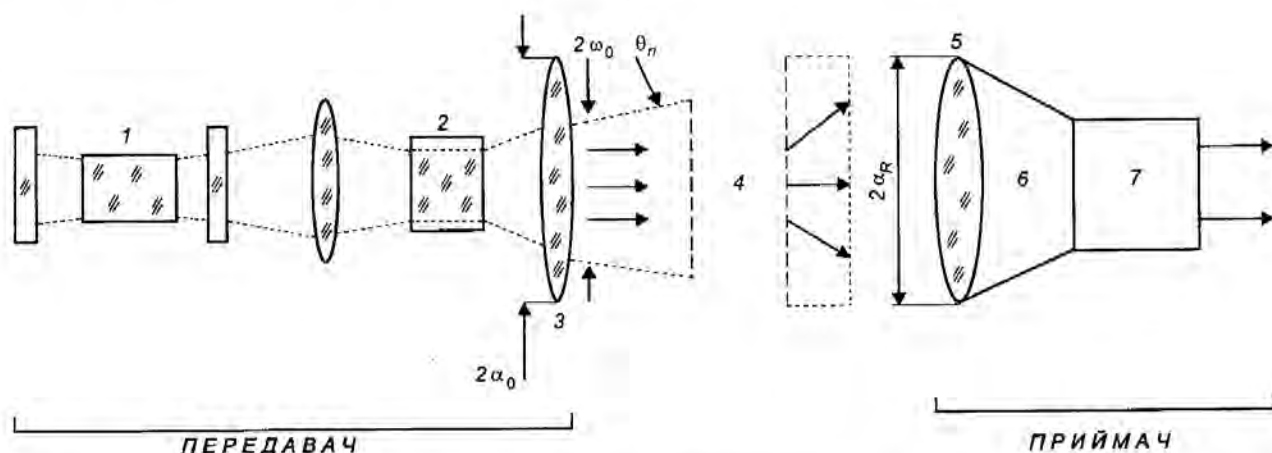


Рис. 2. Схема оптичної лінії зв'язку: 1 – лазерний передавач; 2 – кристал-модулятор; 3 – вихідна лінза передавача; 4 – передаюче середовище; 5 – вхідна лінза приймача; 6 – ФЕП; 7 – схема демодулювання

Параметри деяких лазерних систем космічного зв'язку

Тип лазерного передавача	λ , мкм	Середня потужність передавача, мВт	Діаметр оптичної антени, см	Обробка прийнятого сигналу
CO ₂	10.6	3000	18.4	гетеродинне детектування
Nd ³⁺ :YAG	0.532	400	20.4	пряме детектування
InGaAsP/Nd ³⁺ :YAG	1.064	300	29.8	пряме детектування
GaAlAs-Direct	0.87	200	25.6	пряме детектування
GaAlAs-WDM	0.9	200	25.5	пряме детектування
GaAlAs-Heterodyne	0.87	50	23.4	гетеродинне детектування

Просторовий кут зору приймача

$$\Omega_R = \pi a_R^2 / R^2, \quad (4)$$

де a_R — радіус приймаючої лінзи, а R — відстань між передавачем і приймачем.

З виразу (1) із врахуванням (3) та (4) отримаємо співвідношення для потужностей:

$$P_T = P_R (\lambda^2 R^2) / (\pi^2 a_T^2 a_R^2). \quad (5)$$

Відомо, що відношення сигнал/шум на виході ФАПЧ, що працює з квантовим обмеженням (тобто коли джерело шуму — дробовий шум самого сигналу), описується формулою [6]:

$$S/N = (P_R \eta) / (h \nu \Delta \nu),$$

де η — квантовий вихід ФАПЧ, P_R — порогова оптична потужність приймача.

Таким чином, для $\lambda = 0.53$ мкм, $\eta = 0.2$, $\Delta \nu = 10^9$ Гц, $S/N = 10^3$ отримаємо $P_R \approx 2 \cdot 10^{-6}$ Вт. А згідно з (5) потужність лазерного передавача при відстані $R = 7.0030 \cdot 10^7$ м становитиме $P_T \approx 200$ мВт.

Якщо прийняти, що ефективність перетворення потужності джерела живлення в потужність лазерного випромінювання становить приблизно 2 %, то кожен супутник повинен віддавати ≈ 10 Вт для живлення системи оптичного зв'язку. Подальше зниження споживчої потужності можливе за рахунок використання більш ефективних джерел лазерного випромінювання, а також приймачів оптичного сигналу з підвищеною квантовою ефективністю.

Розвиток напівпровідникових технологій останнього десятиріччя спричинив появу лазерних систем і оптичних приймачів нового класу — напівпровідникових лазерних випромінювачів і лавинних фотоприймачів. Ці елементи зараз широко використовуються в наземних оптоволоконних системах зв'язку [1, 2], а також є основними складовими частинами в експериментах з космічного зв'язку [18]. Параметри найбільш поширених приймально-передавальних лазерних систем наведені в таблиці. Аббревіатури тут означають такі типи лазерних пе-

редавачів: CO₂ — вуглецевий лазер; Nd³⁺:YAG — лазер на гранаті з подвоєнням частоти; InGaAsP/Nd³⁺:YAG — напівпровідниковий лазером з підсилювачем на Nd³⁺:YAG; GaAlAs-Direct — напівпровідниковий лазер; GaAlAs-WDM — напівпровідниковий лазер з мультиплексуванням частот; GaAlAs-Heterodyne — напівпровідниковий лазер.

Наведемо короткі характеристики деяких найбільш масштабних проектів з космічного зв'язку [11, 13].

SILEX (Semiconductor Intersatellite Link Experiment). Кінцева стадія експерименту запланована на 1998 рік. Проект SILEX виконується за програмою Європейського космічного агентства (ЕКА), яка передбачає запуск геостационарного супутника ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite). В проєкті також беруть участь супутники DRS 1 (ЕКА), SPOT 4 (Франція), OICETS (Японія). DRS 1 матиме геостационарну орбіту, тоді як SPOT 4 і OICETS є низькоорбітальними супутниками (LEO, рис. 3). Апаратний комплекс проєкту SILEX вже пройшов наземні тести і знаходиться у завершальній стадії, але космічна частина експерименту призупинена, тому що змінено розклад запусків SPOT 4 та ARTEMIS.

Система SILEX розроблена для оптичної передачі інформації на відстані до 45000 км і використовує лазерні діоди як передавачі сигналу. Канали прямої і зворотної передачі розділені спектрально: канал прямої передачі використовує лазерний діод з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 819$ нм, канал зворотної передачі використовує лазерний діод з $\lambda = 847$ нм. Розрахункові параметри пилдкості передачі даних між геостационарними і низькоорбітальними терміналами: LEO—GEO (зворотний канал) — 50 Мбіт/с, GEO—LEO (прямий канал) — 2 Мбіт/с. Окрім передавачів, GEO термінал обладнаний випромінювачем з довжиною хвилі 801 нм, що є оптичним маяком. Промінь маяка має ширину 750 мкрад, зв'язкові промені мають ширину 10 мкрад (LEO) та 16 мкрад (GEO). Як фотоприймачі використовуються лавинні фотодіоди. Те-

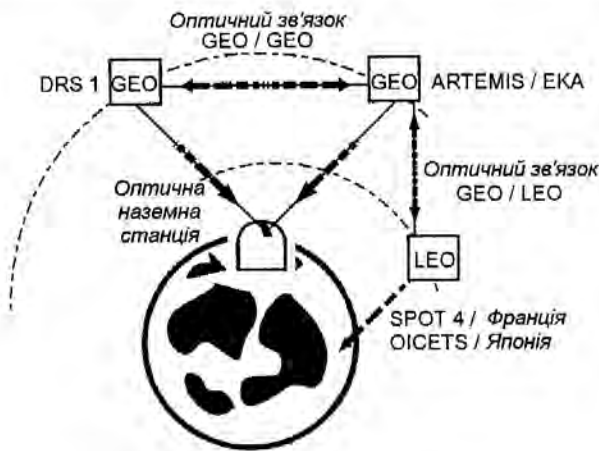


Рис. 3. Базова схема експерименту SILEX

доскопи на всіх GEO/LEO — терміналах виконані за оптичною схемою Кассегрена і мають діаметр 25 см. Оптична наземна станція розміщена на Канарських островах (Тенерифе) і обладнана телескопом з діаметром головного дзеркала 1 м.

OICETS (Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite). Кінцева стадія експерименту перенесена з 1998 р. на 2000 р. Проект OICETS розробляється Національним космічним агентством Японії (NASDA) для перевірки і тестування технології оптичної передачі даних спільно з ARTEMIS (ЕКА). Запуск супутника перенесений з 1998 р. на 2000 р. в зв'язку із затримкою запуску ARTEMIS. OICETS буде розміщений на низькій циркулярній орбіті на висоті 590 км з нахилом 35°. Апаратна модель лазерного терміналу OICETS — LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment) виготовлена і тестована в 1997 р. Вона базується на двох лазерних діодах потужністю 200 мВт. Прямий канал передачі з ARTEMIS на OICETS забезпечить швидкість 2.048 Мбіт/с на $\lambda = 819$ нм. На LUCE також змонтовано оптичний маяк з випромінюванням на $\lambda = 801$ нм. Зворотна передача OICETS на ARTEMIS здійснюватиметься на $\lambda = 847$ нм з швидкістю 49.3724 Мбіт/с.

В подальшому OICETS буде включено до спільного проекту SILEX—ARTEMIS—SPOT 4.

STRV-2 (Space Technology Research Vehicle 2) 1998. Завершення експерименту заплановане на 1998 рік. Апаратура лазерної комунікації проекту STRV-2 розроблялась на замовлення Організації по захисту від балістичних ракет (США) і планувалася для запуску в липні 1998 р. в складі супутника TSX-5 (Air Force Mission TSX-5).

Загальна маса апаратури — 13.86 кг. Система розроблена для зв'язку супутник—Земля на від-

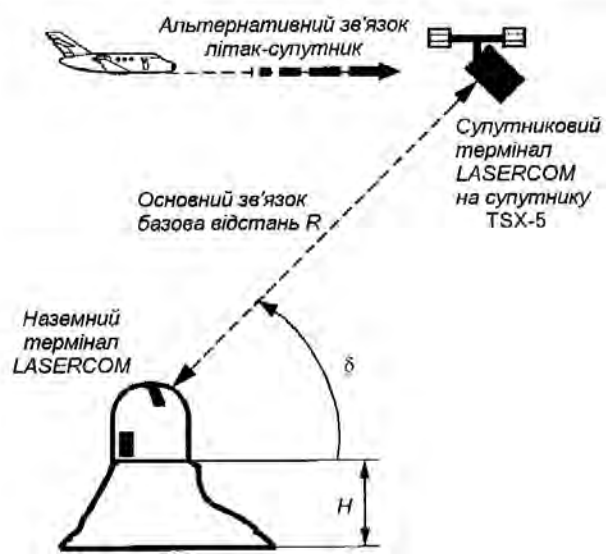


Рис. 4. Базова схема експерименту STRV-2

дадь до 2000 км з швидкістю передачі даних до 1.24 Гбіт/с. Наземні термінальні станції розміщені на висоті 7000 футів (Table Mountain) і 10000 футів (Haleakala) (рис. 4). Супутник запущено на еліптичну орбіту 410х1750 км з нахилом 70°. Окрім наземних терміналів в експерименті буде задіяний альтернативний канал зв'язку з літака на супутник. Оптична система складається з головного телескопа діаметром 12.7 см, що забезпечує наведення на оптичний маяк і швидкісний прийом даних — два канали по 620 Мбіт/с. Передавальна частина складається з восьми розміщених навколо телескопа ідентичних напівпровідникових лазерів з довжиною хвилі випромінювання 810 нм які передають дані з швидкістю 620 Мбіт/с. Паралельний режим передачі забезпечує загальний параметр 1.24 Гбіт/с. Два лазерних маяки для точного наведення генерують випромінювання на $\lambda = 852$ нм. Наведення забезпечується за допомогою чутливої ПЗЗ камери. Сигнали зв'язку приймаються швидкісними лавинними фотодіодами.

II. ЛАЗЕРИ В ЛОКАЦІЇ

Одним з важливих аспектів застосування лазерів є визначення положення об'єкта (наприклад супутника, ракети, корабля) та відстані до нього. В цій області лазери відкривають великі можливості, пов'язані з малою довжиною хвилі їх випромінювання (і як наслідок — малою розбіжністю променя). Саме для цього лазери використовуються в

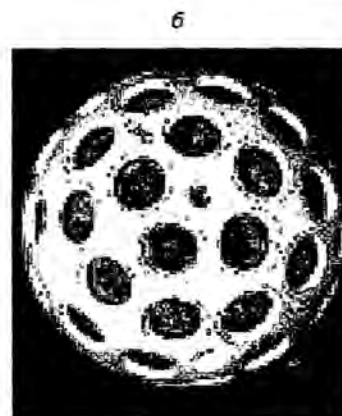
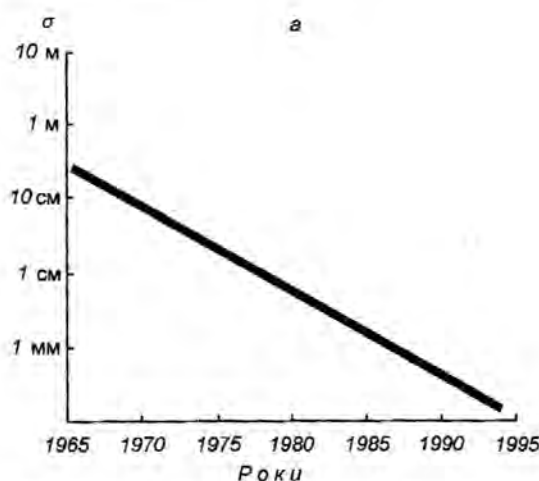


Рис. 5. Динаміка підвищення точності станцій лазерної локації ШСЗ (а) і зовнішній вигляд геодезичного супутника GFZ (б)

системах, що працюють за принципом радара. Це оптичні радари або лідари (скорочено від англійських слів *light detection and ranging*) [2].

Розміщення лазерних локаторів на супутниках призвело до появи окремого напрямку досліджень — космічної альтиметрії. За останній час в цьому напрямку було проведено кілька масштабних експериментів. Показовим є, на наш погляд, американський проєкт NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous) [7]. Запущений в 1996 р. під час перших місій «Discovery», супутник був оснащений лазерним альтиметром на базі Cr,Nd:YAG-лазера (1 Гц, 15 мДж, 12 нс, 1064 нм) і телескопа Кассегрена з лавинним фотоприймачем. Головна мета проєкту — дослідження з близької відстані астероїда EROS, що має розміри 13×15×36 км. Після трирічної подорожі до об'єкта супутник вийшов на 50-кілометрову навколоастероїдну орбіту і провів сеанси вимірювання елементарного складу, внутрішньої структури і топографії поверхні. За отриманими даними була складена карта поверхні астероїда з точністю 31.5 см.

Дані космічних альтиметрів є надзвичайно важливими для сучасної планетології та океанології тому що дають можливість кращого розуміння процесів формування і ранньої еволюції Землі і Сонячної системи в цілому. З іншого боку, розвиток наук про Землю та її екологічний стан, розвиток космічної технології та освоєння людиною космосу призвів до використання лазерної локації в комплексі робіт щодо спостереження штучних супутників Землі.

Перші експерименти з цього напрямку ініційовані NASA в 1964 р. за програмою «Explorer-22», а також визначення точного положення супутника «Beacon-B». На супутнику були розміщені кілька

відбивачів, а наземні станції спостереження, оснащені лазерними передавачами, могли отримувати відбитий лазерний промінь, визначаючи час проходження світла від станції до ШСЗ і у зворотному напрямку. З цього часу і почався активний розвиток методів лазерної локації ШСЗ.

Дуже багато інформації отримується з лазерно-локаційних спостережень ШСЗ при відповідній обробці накопичених даних з різних точок земної поверхні. Такі дані використовуються в геодезії, топографії, сейсмології, астрономії, авіації [1].

Історія використання лазерів в локації сягає вже 40-річного періоду. За цей час кардинально змінилися методи, склад апаратури і, як наслідок — точність отримуваних даних (рис. 5, а). Сучасні спеціалізовані ШСЗ вже оснащені великою кількістю відбивачів (рис. 5, б). Супутники моніторингу, зв'язку та інших призначень також оснащуються лазерними відбивачами, бо без знання точних орбіт супутників неможливе створення постійно діючої мережі супутників зв'язку або екологічного моніторингу. Для останніх, це, перш за все, визначення точного моменту часу проведення спостережень над відповідним регіоном Землі і фіксованої висоти над її поверхнею.

За останні 30 років світова спільнота створила глобальну мережу станцій лазерної локації ШСЗ (Global SLR Network), що дало можливість узагальнення величезної кількості спостережень за різноманітними ШСЗ. Таким чином, мережа стала потужним джерелом даних для вивчення твердої Землі, її океанів і атмосферної системи, в тому числі для:

- визначення і моніторингу руху тектонічних плит, деформацій поверхні, руху полюсів Землі;

GLOBAL SLR NETWORK



Рис. 6. Розташування станцій лазерної локації ШСЗ

- топографії Землі і зміни континентальних льодових мас;
- моделювання просторових і часових варіанцій гравітаційного поля Землі;
- визначення припливів в океанському басейні;
- моніторингу океанічних течій;
- моніторингу (на міліметровому рівні) положення центра мас загальної системи Землі (тверда Земля—атмосфера—океани) та ін.

На сучасному етапі мережа лазерних станцій нараховує 43 станції і продовжує зростати (рис. 6). Загалом в глобальній мережі беруть участь більш як 30 країн. В глобальну мережу СЛЛ структурно входять три великі підмережі — мережа станцій НАСА, мережа станцій Європейського співтовариства і мережа Західно-Тихоокеанського регіону. Україна, станом на 1998 рік, представлена однією постійно діючою станцією лазерної локації ШСЗ в м. Симеїз (Крим), а також має експериментальну станцію III покоління і Центр обробки даних лазерної локації в Києві.

Станція лазерної локації (СЛЛ) — це комплексна система, що складається з кількох взаємно

пов'язаних модулів і може працювати в перманентному режимі. Перманентна СЛЛ повинна забезпечувати постійну видачу результатів за наступних умов: режим роботи — напівавтоматичний, цілодобовий, цілодобовий, імпульсно-періодичний; результати — локація геодезичних супутників усіх типів; точність отриманих даних не повинна бути гіршою за 8 см; отримання розрахованих ефемерид супутників і відправка результатів вимірювань проводиться через Internet в максимально короткі терміни; температурні умови $-30^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$; вологість — $0 \dots 90\%$; тиск — до 1200 мб.

Наведемо короткі характеристики головних підсистем типової СЛЛ. На рис. 7 зображена блок-схема такої станції.

Приймально-передавальний телескоп СЛЛ — це альт-азимутальний оптичний дзеркальний телескоп (приймальна частина побудована, як правило, за схемою Кассегрена) діаметром 0.5–1 м. Еквівалентна фокусна відстань телескопа на прийом становить 10–40 м. Передаюча частина — окремий ліззовий (рефрактор, схема Галілея) телескоп діаметром 100–200 мм для формування і напрямлен-

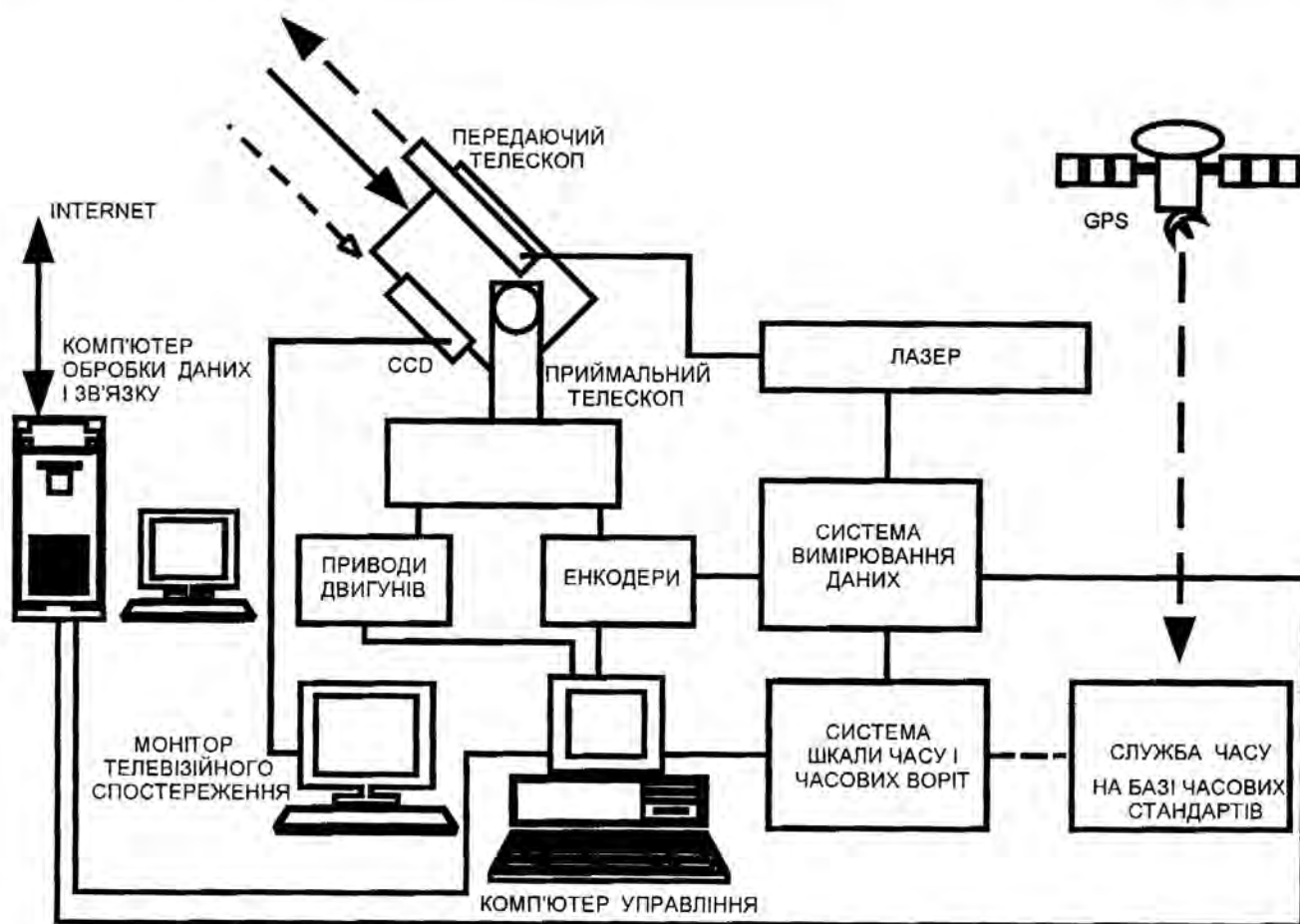


Рис. 7. Узагальнена блок-схема сучасної СЛД

ня лазерного променя на ШСЗ. Телескоп також обладнаний системою визначення кутів повороту, системою візуального гідуювання, приводами двигунів для швидкісного супроводження ШСЗ і оптичною схемою Куде, що дозволяє виводити випромінювання лазерного передавача через вісь телескопа незалежно від його положення по азимуту або висоті.

Лазерний передавач. Лазерний передавач — це, як правило, твердотілий імпульсний лазер на YAG:Nd^{3+} з подвоєнням частоти випромінювання, тобто довжина хвилі вихідного випромінювання $\lambda = 532$ нм. Його вихідні характеристики:

Довжина хвилі лазерного випромінювання	532 нм
Енергія в імпульсі	10–100 мДж
Відносна нестабільність енергії	$\leq 10\%$
Тривалість імпульсу за рівнем 0.5	30–300 пс
Нестабільність тривалості імпульсу	5 % від тривалості

Модовий склад випромінювання	ТЕМ ₀₀
Розбіжність випромінювання	0.4 мрад
Частота слідування імпульсів	до 10 Гц

Система вимірювання даних. Складається з кількох функціональних частин, але основною з них є прецизійний вимірювач часових інтервалів (ВЧІ). Призначений для вимірювання інтервалу часу між сигналами СТАРТ—СТОП, тобто сигналів початку і кінця вимірювань відстані до ШСЗ. Для отримання необхідної точності вимірювань, ВЧІ повинен забезпечувати вимірювання інтервалів часу 0–3 с з відносною точністю до 20×10^{-12} с. Дискретність вимірювання повинна бути синхронізована з старт-стоп-сигналами. Абсолютна похибка вимірювання інтервалів часу не повинна перевищувати 100 пс. ВЧІ синхронізується до опорної частоти 5 МГц, що наближається до нього з кварцового стандарту частоти.

Автоматична метеослужба. Для врахування різноманітних поправок, пов'язаних перш за все з

впливом нижніх шарів атмосфери, СЛЛ обладнується автоматичною метеослужбою. Дані метеослужби приєднуються до файлів даних вимірювань супутників разом з файлами загальних калібровок системи. Автоматична метеослужба повинна забезпечувати постійне отримання і запис через послідовний порт комп'ютера параметрів: вологості (в межах 0–100 % з точністю 1 %); тиску (в межах 700–1200 мб з точністю 0.1 мб); температури (в межах $-50 \div +50^{\circ}\text{C}$ з точністю 0.5 $^{\circ}\text{C}$).

Служба часу призначена для точного визначення моменту події, тобто моменту окремого вимірювання проходження ШСЗ. Повинна забезпечувати шкалу всесвітнього часу з точністю прив'язки до часового сталону не гірше 100 нс, з дискретністю 1 мкс. Точно синхронізується (≈ 1 мкс) за допомогою шкали часу, що забезпечується глобальною сателітною системою GPS. Використовується в подальшому для точного визначення часових воріт отримання корисного сигналу від ШСЗ.

Фотоприймачі сигналів СТАРТ–СТОП. Як фотоприймачі сигналів СТАРТ використовуються лавинні напівпровідникові фотодетектори. Основна вимога до них полягає у формуванні вихідного електричного імпульсу запуску вимірювань, що має короткий передній фронт (≈ 1 нс) і не залежить від коливань вхідного оптичного сигналу з лазерного передавача. Як фотоприймачі сигналу СТОП в основному використовуються три типи фотодетекторів – фотоелектронні помпозувачі, лавинні фотодетектори і одnofотонні лавинні фотодіоди. Головні характеристики СТОП-детекторів – високі чутливість і часова роздільна здатність.

Описана вище СЛЛ на даний час є досить дорогою спорудою, укомплектованою великою кількістю дорогого обладнання і обслуговуваною кваліфікованим персоналом. Отже, особливо важливим питанням є створення постійно діючої мережі автоматичних станцій, що керувались би з одного центру, були укомплектовані стандартним обладнанням і не мали б обслуговуючого персоналу.

Одним з відомих проєктів щодо створення стандартизованої автоматичної мережі СЛЛ є проєкт, започаткований кілька років тому НАСА [21]. Проєкт отримав назву СЛЛ-2000 (SLR-2000). Суть проєкту полягає в створенні на території США мережі СЛЛ субсантиметрової точності нового покоління, що забезпечила б отримання найсучасніших вимог до даних лазерної локації ШСЗ і значно знизила б вартість окремої станції.

Станції проєкту СЛЛ-2000 якісно відрізнятимуться від існуючих сьогодні. СЛЛ-2000 є повністю автоматичною, малогабаритною станцією, що не потребує втручання операторів і здатна працювати

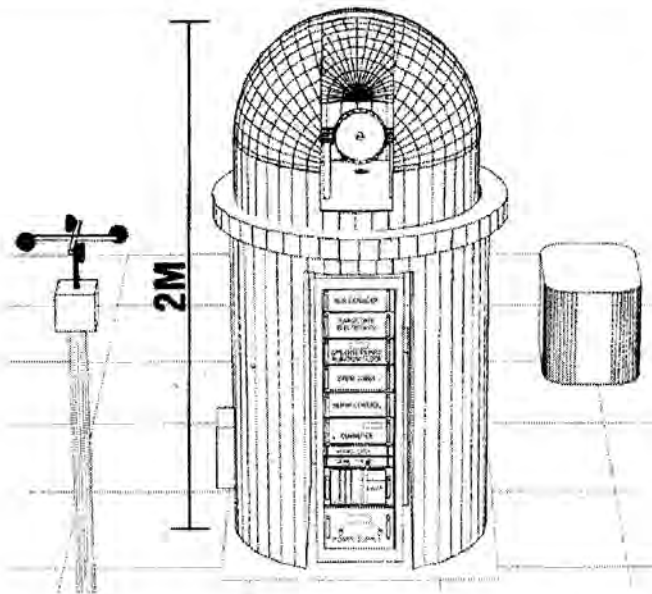


Рис. 8. Зовнішній вигляд і розміщення апаратури СЛЛ-2000

без збоїв протягом 2–3 місяців. Станція відповідає всім вимогам екологічних і медичних стандартів, є повністю безпечною для навколишнього середовища і людини. Всі процеси контролю і управління станцією здійснюються за допомогою телекомунікацій та мережі Internet.

Технологічні особливості побудови і структури станції досить цікаві, тому коротко охарактеризуємо ключові моменти проєкту.

СЛЛ-2000. Основна система (рис. 8) складається з трьох частин – оптичної, електронної та метеорологічної. Перші дві частини розміщені в корпусі станції, третя виведена назовні. Оптична частина складається з лазерного передавача, швидкісного перемикача «передача/прийм», оптичного телескопа, системи супроводження на базі ПЗЗ (ICCD), СТАРТ–СТОП детекторів, а також приводів та кутовимірювальних систем. Оптичний телескоп має робочу апертуру 30 см і працює інтегровано на режимах прийому/передачі.

Кардинально відмінним від існуючих є лазерний передавач. В його побудові застосовано найсучаснішу «мікролазерну» технологію. Лазерний передавач побудований за принципами діючої накачки з модуляцією добротності випромінювання, здатний випромінювати 100–280 пс імпульси з частотою до 5 кГц на довжині хвилі 532 нм з вихідною енергією до 30 мкДж. Лазер має настільки малі розміри, що стало можливим його розміщення разом з СТАРТ–СТОП-детекторами і камерою супроводження в загальному корпусі оптичного телескопа.

Зазначена вихідна енергія передавача забезпечує не тільки локацію ШСЗ, але й дотримання відповідних стандартів на критичну величину лазерного випромінювання для людей, техніки і навколишнього середовища.

Окремим проектом в рамках СЛЛ-2000 передбачається розробка і тестування лазерних передавачів з ІЧ довжиною хвилі випромінювання, що дає можливість знизити вплив атмосфери, підвищити чутливість системи і знизити вихідну енергію передавачів.

Електронна частина включає в себе комп'ютер і твердий диск з блоком безперебійного живлення, синхронізований з GPS рубідієвий стандарт частоти, інтерфейси зв'язку та комунікацій, лічильну та часову електроніку, моніторингові сенсори і необхідні системи живлення та температурного контролю. Метеостанція постійно і в автоматичному режимі вимірює тиск, вологість, температуру і швидкість вітру, передаючи ці дані в головний комп'ютер станції. Окрім того, в головний комп'ютер також передаються дані з GPS-приймача.

Загалом СЛЛ-2000 розрахована на цілодобові спостереження ШСЗ усіх типів (що мають оптичні відбивачі) з субсантиметровою точністю, причому для супутника LAGEOS, за розрахунками, передбачається отримання до 100 сигналів відбиття на нормальну точку (денна локація) і 5000 сигналів відбиття на нормальну точку при нічній локації. Вказані параметри залежать від прозорості атмосфери, кута місця ШСЗ, розбіжності променю передавача, але загалом показують, що СЛЛ-2000 здатна дати збільшення обсягів корисних даних приблизно на три-чотири порядки.

Діючий прототип станції буде розміщено на Годардській геофізичній і астрономічній обсерваторії. Перші сеанси лазерної локації ШСЗ станцією СЛЛ-2000 заплановано на середину 1998 р. В разі успіху останніх, США розпочнуть масове впровадження нової мережі на своїй території. Слід зазначити, що планова вартість СЛЛ-2000 становитиме кілька сот тисяч доларів, що приблизно на порядок менше від вартості стандартної СЛЛ.

Подібні технічні принципи використовуються і при створенні лідарних станцій екологічного моніторингу Землі. Причому для окремих експериментів станції лазерної локації ШСЗ і лідари моніторингу об'єднують в комплексну систему. Так, один з останніх експериментів такого типу проводився японськими дослідниками з використанням ШСЗ ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), запущеного в 1996 р. Головна мета експерименту — визначення спектрів поглинання атмосфери і отримання вертикального розподілу O_3 , CH_4 та HNO_3

на великих відстанях. Це можливо при проведенні вимірювань за схемою Земля — ШСЗ — Земля [22]. На ШСЗ був розміщений моноблочний відбивач діаметром 0.5 м удосконаленої конструкції, що забезпечувала корекцію аберацій, які виникають при русі супутника. Точне супроводження супутника забезпечувалось чутливою ПЗЗ камерою, що детектувала випромінювання 532 нм лазерного передавача. Спектри поглинання визначались за допомогою обладнання, що базувалось на двох CO_2 лазерах. Апаратура працювала в режимі доплерівського лідара [20]. Типовий сеанс вимірювань тривав 200 с. Експеримент продемонстрував можливість отримання більш точних спектрів поглинання, порівняно з наземними експериментами, для зазначених вище молекул. Окрім того, додатково були виміряні концентрації для CO , N_2O , CFC_{12} . Ці молекулярні домішки дуже важливі для оцінки якості навколишнього середовища Землі.

III. ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

Технократичний розвиток суспільства за останнє сторіччя призвів до екстенсивного використання природних запасів та виникнення загрози для життя людини внаслідок забруднення атмосфери і навколишнього середовища продуктами життєдіяльності. Актуальною стала проблема всебічного контролю за екологічним станом планети. Важливе значення має не тільки контроль забрудненості нижньої атмосфери, якою ми дихаємо, а також і верхня атмосфера, яка впливає на спектр і інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на земну поверхню. Саме тому широко використовуються дистанційні методи зондування атмосфери, зокрема за допомогою лазера як джерела високохроматичного випромінювання. В залежності від джерела випромінювання такі методи зондування атмосфери поділяються на пасивні і активні.

Пасивні методи використовують звичайне атмосферне випромінювання (наприклад сонячне або випромінювання Землі). Спостерігаючи взаємодію цього випромінювання з досліджуваними компонентами (поглинання або розсіювання) або теплове випромінювання самих компонентів, отримують інформацію про їх концентрації в атмосфері.

Активні методи характеризуються виселенням в атмосферу штучного випромінювання, і, як правило, лазери використовують як джерело такого випромінювання. Інформація про концентрації досліджуваних компонентів отримується з спостережень таких видів взаємодії випромінювання з атмосферою як розсіювання, поглинання або флуо-

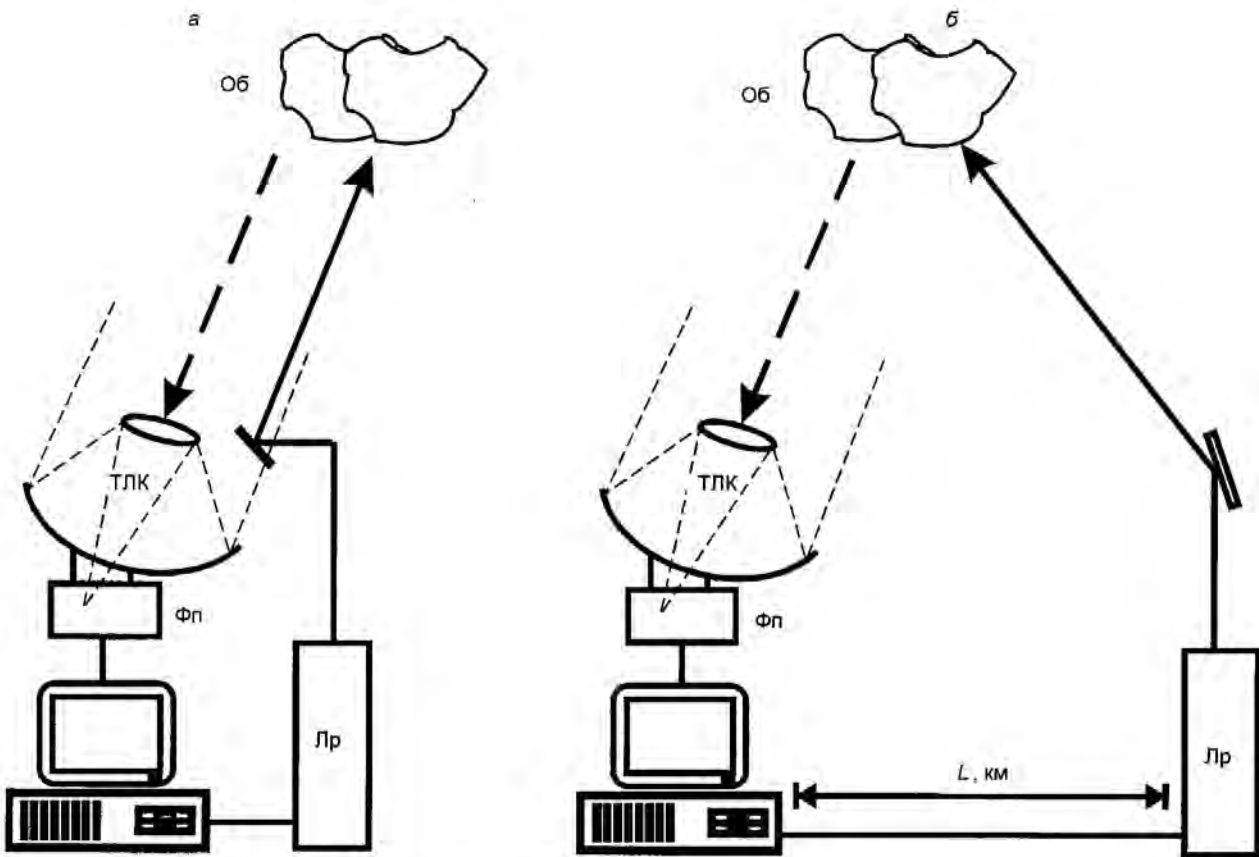


Рис. 9. Оптична схема моностатичної (а) та бістатичної (б) лідарної системи

ресценція. Дано короткі характеристики найбільш поширених лідарних систем [5].

Лідар. Найбільш поширені системи, що просто називаються лідарами (рис. 9, а), є моностатичними, тобто випромінювач і фотоприймач знаходяться поряд. Фотоприймач налаштовується на довжину хвилі лазерного випромінювання. При розповсюдженні в атмосфері лазерне випромінювання взаємодіє з аерозолями і молекулами. Частина розсіяного випромінювання збирається телескопом на чутливий фотоприймач. Інтенсивність отриманого сигналу реєструється як функція часу. Таким чином, визначаючи час розповсюдження лазерного променя і маючи розподіл інтенсивності розсіювання, можна вимірювати просторові характеристики аерозольних або молекулярних скупчень. Потім проводиться аналіз даних для знаходження розподілу аерозолів як у тропосфері, так і в стратосфері.

Лідар на КР. Оптична схема є моностатичною, але доповнюється спектрометром або інтерференційним фільтром, використання яких дозволяє

зробити приймач чутливим до випромінювання, зсуного за довжинами хвиль в результаті комбінаційного розсіювання. Більшість молекул розсіює електромагнітне випромінювання не тільки на збуджуючій довжині хвилі, а також на довжинах хвиль з характерним зсувом внаслідок комбінаційного розсіювання. Величина зсуву є характерною для даного виду розсіюючих молекул, а інтенсивність ліній комбінаційного розсіювання пропорційна концентрації розсіюючих молекул. Лідар на КР використовують для вимірювання ряду молекул атмосфери, включаючи H_2O, SO_2 і CO_2 .

Лідар на резонансних ефектах. Оптична схема є моностатичною. Лідар на резонансних ефектах характеризується точним підбором як довжини випромінювання лазера, так і довжини хвилі випромінювання, що реєструється приймачем, для того, щоб вони збігалися з довжиною хвилі лінії поглинання компонента атмосфери, що досліджується. Збудження молекули на частоті поглинання викликає резонансне розсіювання, що може бути значно інтенсивнішим за перезонансне. Слід зазначити,

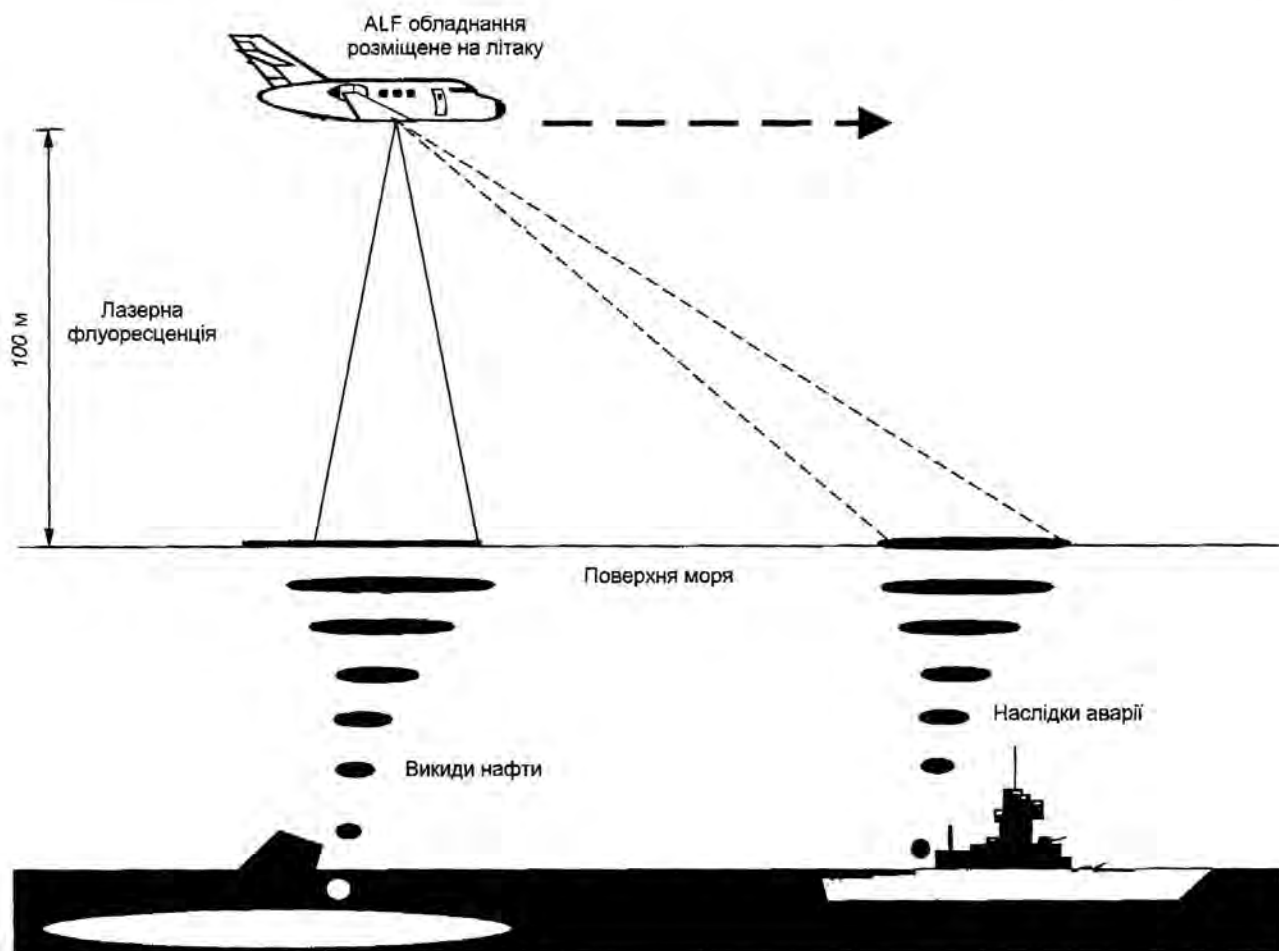


Рис. 10. Лідар, розміщений на авіаційній платформі

що нижні шари атмосфери характеризуються сильним поглинанням молекулами лазерного випромінювання, яке в подальшому не приводить до розсіювання. Цей ефект називається безвипромінювальним гасінням. Він нелінійно зменшує інтенсивність розсіювання в залежності від концентрації молекул, спектри поглинання яких мають резонанс на довжині хвилі лазерного випромінювання. Тому описаний лідар в основному використовується для вимірювання концентрацій атомарних натрію і калію на великих висотах.

Лідар на диференційному поглинанні розсіяного випромінювання. Це одна з лідарних систем, що не використовує прямої реєстрації розсіювання. Вимірювання вибраного виду молекул проводиться за параметрами поглинання лазерного випромінювання. Оптична схема є моностатичною, але в основі роботи системи покладено використання двох (або більше) лазерних променів з різними довжинами хвилі, які послідовно або одночасно посила-

ються в атмосферу. Один промінь поглинається сильно, а другий, зменшений за довжиною хвилі, поглинається менше. Оскільки промені спектрально розділені на невеликий проміжок довжини хвилі, то перерізи аерозольного розсіювання вважаються практично однаковими для обох випадків. З таким припущенням вважається, що різниця інтенсивності розсіювання променів в атмосфері обумовлена різницею їх поглинання досліджуваними молекулами.

Бістатичні лідари. Бістатичні лідари аналогічні простим лідарам, за винятком того, що лазер і телескоп в них просторово розділені (рис. 9, б). При роботі такої системи лазер і телескоп націлюють в одну і ту саму точку атмосфери. Кут розбіжності лазерного променя і кут поля зору телескопа спільно визначають розміри розсіюючого об'єму в точці націлювання. Визначаючи кут, в якому проявляється максимальне розсіювання, отримують інформацію про коефіцієнт заломлення і (або) ін-

формацію про розподіл атмосферних аерозолів за розмірами.

Мобільні лідари. Використання різних типів лідарів на мобільних платформах (літак або автомобіль, [10]), дозволяє проводити екологічний моніторинг великих площ поверхні землі і океану. Так, розроблена компанією World Geoscience Corp. система ALF (airborne laser fluorosensor) [17], що базується на флуоресцентних методах, дозволяє знаходити підводні поклади нафти. Такі поклади завжди мають на поверхні моря тонку плівку нафти, що не перевищує 0.01 мкм. Система створена на базі твердотільного лазера з генерацією на довжині хвилі 266 нм (УФ-діапазон). Лазерні імпульси з частотою 50 Гц посилаються на поверхню океану з літака (рис. 10), що летить на висоті 100 м.

Лазерні імпульси індукують флуоресценцію з будь-якої тонкої нафтової плівки на поверхні, яка в подальшому реєструється. Флуоресценція збирається телескопом і розділяється спектрометром на складові в діапазоні 200–700 нм. На виході спектрометра встановлено 500-канальний площинний фотоприймач. Отримані дані накопичуються в 176-канальному аналізаторі разом з навігаційною, аеромагнітною і екологічною інформацією. Паралельно записується відеоінформація поверхні океану. Забруднення поверхні моря, які також призводять до флуоресценції, ідентифікуються і фільтруються з накопичених даних. В остаточних даних міститься інформація про легкі і важкі фракції нафти. Побічним використанням ALF, як показали експерименти, є виявлення затоплених об'єктів, наприклад кораблів.

Прикладом вдалого поєднання різних типів лідарів на базі автомобільної платформи (рис. 11) може бути система, створена італійськими спеціалістами [12] за принципами лідара на диференційному поглинанні розсіяного випромінювання (DIAL — differential absorption lidar). Основні напрямки використання — вимірювання промислових і міських забруднень та смогів.

Лідар змонтовано на базі однієї вантажівки і має моностаціонарну конфігурацію, що дає змогу проводити вимірювання концентрацій газів у будь-якому напрямку, отримувати просторову роздільність і проводити моніторинг великої площі з однієї фіксованої точки. Радіус дії приладу досягає кількох кілометрів. Система спроможна визначати концентрації домішок SO_2 , NO , NO_2 , O_3 , а також органічні аерозолі. Прилад складається з лазера на Ti: Sh , що накачується другою гармонікою лазера на YAG: Nd^{3+} . Вторинний лазер на Ti: Sh продукує імпульси з енергією 100 мДж в спектральному діапазоні $\lambda\lambda = 750\text{--}850$ нм. Для генерації 10 мДж

імпульсів в УФ-діапазоні використовується подвоєння частоти вихідного випромінювання і частотне змішування з основним лазером, що оперує на довжині хвилі 1064 нм. Випромінювач посиляє в атмосферу 10 мДж імпульси з частотою 20 Гц. Лазерні імпульси взаємодіють з аерозолями і різними хімічними домішками, реакція розсіяння збирається 60-см телескопом Ньютона і фокусується на фотопомножувач. Далі інформація обробляється на комп'ютері і ідентифікується з існуючим банком даних. Особлива увага приділяється утриманню високого динамічного діапазону приймача (> 250000), оскільки потужні викиди, наприклад, диму над заводами, здатні значно послаблювати сигнали розсіяння або насичувати фотодетектор.

Лідари космічного базування. Як вже зазначалося, велике значення для всебічного моніторингу планети має вивчення верхньої атмосфери, її складу і процесів, що впливають на спектр і інтенсивність сонячного випромінювання, що попадає на земну поверхню. Всебічний розвиток космічної техніки став початком проведення моніторингових експериментів для вивчення екології Землі з космосу. Лідари космічного базування проходять початкову стадію втілення в практику дистанційного моніторингу навколишнього середовища, тому зараз вони знаходяться на стадії експерименту.

Перші результати лазерного зондування Землі та її атмосфери з космосу були отримані з допомогою американського лідара, за програмою LITE (Lidar In-Space Technology Experiment) у вересні 1994 р. на космічному човнику «Discovery» [8]. Лідар був побудований за принципом «лідар на КР». Лазерний модуль лідара складався з двох лазерних передатчиків з незалежними джерелами живлення. Основне випромінювання лазерів після потроєння



Рис. 11. Лідар, змонтований на автомобільній платформі

частоти формувалося передаючим телескопом і паралельно напрямлялося на об'єкти. Приймаюча частина лідара складалася з модифікованого телескопа Кассегрена (версія Річчі–Кретьєна), триканального приймача сигналу, позиціонуючого детектора і обробляючої електроніки. Частота повторення імпульсів локації становила 10 Гц. Система мала модульну конструкцію і розрахована на багаторазове використання. В рамках проекту LITE було проведено експериментальне зондування аерозолів і хмар поверхневих шарів атмосфери Землі і отримано перші дані для визначення чутливості, роздільної здатності приладу та обробки отриманих даних [23].

Другий відомий експеримент проводився в Росії з допомогою космічного лідара «Балкан», який мав деякі технологічні відмінності від американського приладу. Ці відмінності стосуються як безпосередньо особливостей використання лідара на орбітальній станції «Мир», так і особливостей самої апаратури (вузьке поле зору, два канали реєстрації і т. і.). Російський лідар «Балкан», виготовлений у 1980-х рр. був виведений в космос в складі модуля «Спектр» на орбітальну станцію «Мир» і призначався для лазерного зондування поверхні Землі та хмарних полів [3]. Вертикальна просторова роздільна здатність становила 3 м при разовому режимі посилення лазерних імпульсів.

ВИСНОВКИ

Використання систем космічного зв'язку забезпечить необхідну стартову базу для початку нового етапу в розвитку суспільства, оскільки обумовить якісний прорив в методах зв'язку і комунікацій, що є основою розвитку інформаційного середовища. Вже зараз в стадії розробки знаходяться проекти, які передбачають збільшення пропускної здатності глобальної комп'ютерної мережі Інтернет за рахунок використання міжсупутникового оптичного зв'язку, проекти щодо створення локальних мереж за таким же принципом і багато інших.

Моніторинг геодинамічних процесів та їх оперативний прогноз вимагають отримання великих обсягів інформації за допомогою мережі СЛЛ ШСЗ і наступної їх обробки в режимі реального часу, що означає обробку і відправку отриманих даних локації кожного супутника зразу ж після проведення сеансу локації. Причому, одночасне отримання даних необхідне з різних СЛЛ, що розміщені в різних точках земної кулі. Дотримання такої вимоги приводить до необхідності створення не просто мережі СЛЛ, а мережі, що діє ґрунтовно по всій

поверхні Землі і синхронізована в часі спостережень [19]. Зважаючи на різні кліматичні умови, технічні особливості, організаційні питання, постає необхідність створення організаційно закінченої структури, що координувала б одночасну роботу СЛЛ за єдиним графіком і в єдиному стандарті. В 1998 р. розпочато роботу щодо створення такої структури, що матиме назву ILRS (International Laser Ranging Service). Ця структура включатиме представників СЛЛ усіх країн, що працюють в проєктах лазерної локації ШСЗ та Місяця, і координуватиме роботу світової мережі СЛЛ.

Лідари наземного стаціонарного і мобільного базування широко впроваджуються технологічно розвинутими країнами світу для забезпечення належного контролю за екологічним станом планети. Методологія і технологія виготовлення лідарів космічного базування, розробка методики обробки експериментальних результатів, а також перспективи подальшого розвитку дистанційного зондування атмосфери за допомогою супутників, є актуальними проблемами космічної галузі початку XXI століття [14–16].

1. Георгиев Н. И. Использование оптических наблюдений искусственных спутников Земли для геодезии. — София: Изд-во БАН, 1979. — С. 43–56.
2. Звелто О. Физика лазеров. — М.: Мир, 1979. — С. 287–288, 265–270.
3. Зуев В. Е., Балин Ю. С., Тихомиров А. А. и др. Лазерное зондирование Земли из космоса. I. Российский лидар космического базирования БАЛКАН // Космич. наука и технология. — 1997. — 3, № 1-2. — С. 16–25.
4. Козанне А., Флере Ж., Метр Г., Руссо М. Оптика и связь. — М.: Мир, 1984. — 502 с.
5. Хинкли Э. Д., Зуев В. Е. Лазерный контроль атмосферы. — М.: Мир, 1979. — 412 с.
6. Ярич А. Введение в оптическую электронику. — М.: Высш. шк., 1983. — 396 с.
7. Cole T. D. Near Earth Asteroid Rendezvous // Laser Focus World. — Sept. 1996. — P. 77–86.
8. Crockett S. K. NASA / Langley Research Center, Mechanical design of a lidar system for space applications LITE // Laser Radar V: Proc. SPIE. — 1990. — 1222. — P. 164–177.
9. DeMeis R. Laser secures troop communications // Laser Focus World. — Sept. 1996. — P. 32.
10. DeMeis R. Mobile laboratory supports IR Lidar development // Laser Focus World. — Sept. 1996. — P. 31.
11. Free-Space Laser Communication Technologies IX // Proc. SPIE. — 1997. — 2990. — P. 150–160.
12. Garifo L. Optical systems monitor atmospheric pollutants // Laser Focus World. — April 1997. — P. 95–105.
13. Laser Communication Program Overviews «Free-Space Laser Communication Technologies II» // Proc. SPIE. — 1990. — 1218. — P. 2–27.
14. Laser Radar V // Proc. SPIE. — 1990. — 1222. — 204 p.
15. Lidar Techniques for Remote Sensing III // Proc. SPIE. — 1995. — 2956. — 238 p.

16. Matvienko G. G., Zuev V. E., Shamanaev V. S. et al. Lidar BALKAN-2 for space platform ALMAZ-1B // Proc. SPIE. — 1994. — **2310** — P. 161–163.
17. Mortensen P. Airborne fluosensor may find underwater treasure // Laser Focus World. — Sept. 1996. — P. 48.
18. Paul D. K. Mass, prime power, and volume estimates for reliable optical intersatellite link payloads // Proc. SPIE «Free-Space Laser Communication Technologies II». — 1990. — **1218**. — P. 40–50.
19. Pearlman M., Report of SLR/LLR Subcomission of CSTG, Maratea, Italy, June 1997.
20. Pearson G. N., Rye B. J., Hardesty R. M. Design of a high pulse repetition rate CO₂ Doppler lidar for atmospheric monitoring // Laser Radar V, Proc. SPIE. — 1990. — **1222**. — P. 142–153.
21. Satellite Laser Ranging in the 1990s // NASA Conf. Publ. 3283. — 1994. Belmont Workshop.
22. Sugimoto N., Saito Ya., Aoki T. et al. Laser transmitter/receiver system for earth-satellite-earth long-path absorption measurements of atmospheric trace species using

the retroreflector in space // Optical Engineering. — 1997. — **36**(12). — P. 3235–3241.

23. Winker D. M., McCormick M. P. Observation of aerosol and clouds with LITE // Proc. SPIE. — 1995. — **2581**. — P. 70–78.

THE CURRENT STATE OF THE ART IN THE USE OF THE LASERS IN SPACE COMMUNICATION, LASER RANGING AND REMOTE SENSING

D. Ya. Yatskiv

The general description of the state of the art in the development of space communication, laser ranging, and remote sensing is given. The methods, set-up, and general parameters of the main devices and experiments are reviewed and discussed. The paper is based on the review of periodicals.

УДК 523.746.5

Аналіз закономірностей мікро-макроструктури сонячної циклічності

К. С. Войчишин

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Аналізується стан дослідження тонкої структури геліофізичних циклічних часових рядів. Відзначаються методичні труднощі виділення і підтвердження реальності існування близького до річного компонента місячних флуктуацій чисел Вольфа. Досліджується зв'язок параметрів тонкої структури сонячного циклу з внутрішньощиклічними і віковими змінами його параметрів. Подаються результати обробки середньомісячних чисел Вольфа, що служать основою кількісної інтерпретації і узагальнення закону Швабе–Вольфа. Наводяться аргументи, що підтверджують зв'язок мікро-макроструктури часових рядів індексів сонячної активності.

ВСТУП

Існування тонкої структури 11-річної циклічності індексів сонячної активності відзначалося неодноразово [20, 23]. Виділення на циклічній кривій так званих переломних точок, які опосередковано підтверджують цю структуру, пов'язане, однак, зі значними труднощами [3]. Останні обумовлені головним чином наявністю багатокомпонентних місячних флуктуацій. Їх окремі компоненти виявляють складну залежність від фази 11-річного [6], а можливо, і 22-річного [1] циклів. Ця обставина створює проблему, яку важко розв'язувати, і вимагає певних припущень щодо структури геліофізичних індексів і нестандартних підходів до розробки відповідних засобів обробки даних. Стаття присвячена викладу одного із таких підходів і огляду отриманих в його рамках результатів дослідження мікро-макроструктури сонячної циклічності.

1. Джерела припущень

Серед місячних флуктуацій індексів сонячної активності значну наукову і практичну цінність передусім має близька за періодом до річного складова.

Зусилля багатьох дослідників протягом більш ніж піввіку не дали [1–4, 16, 17] остаточної відповіді на питання про її реальність. Частотно-часовий аналіз короткоперіодичних коливань середньомісячних чисел Вольфа, усереднених за один оберт Сонця площ сонячних плям підтвердив їх реальність лише на обмежених часових інтервалах. Цюріхський часовий ряд з виключеною регулярною складовою через це трактують [17] як реалізацію локально стаціонарного випадкового процесу. В умовах відсутності обгрунтованої гіпотези про ергодичність досліджуваного процесу такий висновок, однак, не бездоганий. З його врахуванням гіпотетична, близька до річної складова може бути віднесена до коливань з випадково розподіленою фазою. Для сумарних площ сонячних плям, згідно з тими ж дослідженнями, стійкість фази коливань з періодом близьким до одного року ймовірно має місце.

З методичної точки зору ці висновки також досить вразливі. В них, наприклад, нічого не сказано про врахування вікових змін потужностей і тривалостей 11-річних циклів. Якщо ці зміни не брати до уваги, то усереднені ординати циклічних кривих будуть враховані з різними вагами. А це, в умовах обмеженого обсягу даних, знижує достовір-

ність висновків як відносно реальності шуканої компоненти, так і відносно величини її середнього періоду.

Викладені результати і виявлені труднощі виділення і аналізу тонкої структури індексів сонячної активності значною мірою можна здолати. Для цього необхідно прийняти і підтвердити гіпотезу існування тісного зв'язку між параметрами тонкої структури індексів сонячної активності і внутрішньоциклічними і віковими змінами її макронпараметрів: потужності S , тривалості T , фази ψ та асиметрії α . В цьому випадку акцентована проблема, як буде показано далі, зводиться до задачі оптимального розбиття індексів сонячної активності на цикли і зведення останніх до середніх значень їх макронпараметрів з допомогою порівняно простих обчислювальних процедур [7, 12].

2. ОБГРУНТУВАННЯ ПІДХОДУ І ВИБІР МОДЕЛІ

Як найбільш стійке і єдине статистичне утворення [20] 11-річний цикл індексів сонячної активності характеризується певною формою. Хоча для всіх циклів шоріхської нумерації ця форма і не є однакою [21], з точністю до обмеженого числа параметрів її можна трактувати як статистично стійку характеристику [7]. Тоді 11-річну циклічність чисел Вольфа, наприклад, можна трактувати як послідовність стохастичних циклів з параметрами S, T, ψ і функцією їх форми Φ . Мінливість параметрів сонячних циклів носить в загальному випадку нестационарний характер. Зведена до однакових значень цих параметрів функція форми $\Phi_{T,\alpha}(\tau, \alpha, \beta, \dots)$ припускається статистично стійкою, принаймні в широкому розумінні, характеристикою. Тому мінливість параметрів $\alpha, \beta, \dots$ гіпотетично обмежена однорідністю їхніх статистичних характеристик до другого порядку включно. В реальних сигналах статистична стійкість форми циклів з потрібним ступенем наближення може і не існувати, а тому потребує в кожному конкретному випадку спеціального дослідження.

Оскільки властиві геліофізичним часовим рядам порушення статистичної стійкості форми 11-річних циклів проявляються головним чином у випадковій гіпотетично нестационарній мінливості тривалості вітки росту T' відносно загальної тривалості T [8], то за параметр α природно взяти коефіцієнт асиметрії

$$\alpha = \frac{T'}{T}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \tag{1}$$

В рамках вибраної моделі циклічності функція $\Phi_{T,\alpha}(\tau, \alpha, \beta, \dots)$ описує цикли будь-якої тривалості, тому коефіцієнт α буде визначати асиметрію як вихідних, так і зведених до однакової тривалості циклів, тобто

$$\alpha = \frac{T'}{T} = \frac{T'_c}{T_c},$$

де T'_c і T_c — відповідно тривалість вітки росту і тривалість усередненого циклу. Отже, циклічну структуру чисел Вольфа можна описати параметричною моделлю у вигляді

$$w(t) = \sum_{j=1}^{\tau} S_j \Phi_{T_j, \alpha_j}(\tau_j) + v(t). \tag{2}$$

Тут потужність 11-річного циклу визначається виразом

$$S(j) = \int_{t_{1,j}}^{t_{2,j}} w(t) dt,$$

$\Phi_{T,\alpha}(\tau)$ — нормована на одиницю функція форми

$$\Phi_{T,\alpha}(\tau) \equiv 0 \quad \text{для} \quad \tau < 0 \quad \text{і} \quad \tau > T,$$

$v(t)$ — деяка аддитивна шумова складова. Аргумент функції форми τ_j , тривалість T_j і фаза ψ_j визначаються границями j -го циклу $t_{1,j}$ і $t_{2,j}$ як $\tau_j = (t - t_{1,j}), T_j(t_{2,j} - t_{1,j})$ і $\psi_j = (t_{1,j} - t_{2,j-1})$.

Запропонована параметрична модель дозволяла сформулювати і розв'язувати задачу оцінювання параметрів і функції форми 11-річного циклу чисел Вольфа і тим самим підтвердити гіпотезу статистичної стійкості форми сонячного циклу та наявності її тонкої структури, зокрема, близької до річної складової.

3. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ОЦІНЮВАННЯ

Припустимо, що зведена до середніх значень параметрів T_c і α_c функція $\Phi_{T_c, \alpha_c}(\tau)$ відображає загальні закономірності сонячної циклічності і є відомою. Тоді шляхом лінійного перетворення аргументу вітки росту

$$\Phi_{T_c, \alpha_c}(\tau), \quad 0 \leq \tau \leq \alpha_c T_c$$

і вітки спаду

$$\Phi_{T_c, \alpha_c}(\tau), \quad \alpha_c T_c \leq \tau \leq T_c$$

за допомогою викладених в роботі [12] співвідношень можна обчислити функцію форми будь-якої тривалості і асиметрії.

Якщо за критерії близькості вибрати віддаль між деяким еталонним циклом

$$Z_{ET}(t) = S\Phi_T, \alpha(\tau)$$

і вихідним $Z_B(t)$ циклами у вигляді цільової функції

$$F(S, \alpha, T, t_i) = \left[\frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} [Z_B(t) - Z_{ET}(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

то задача оптимального оцінювання за критерієм мінімуму середнього квадратичного відхилення параметрів 11-річної і близької до річної складової чисел Вольфа зводиться до задачі мінімізації вигляду

$$\sigma = \min_{S, T, \alpha, t_i} F[S, T, t_i]. \quad (4)$$

Використання співвідношень (3), (4) передбачає розбиття вихідного часового ряду на цикли, а останніх, як це видно із (1), — на вітки росту і спаду [12]. Представлення чисел Вольфа у вигляді параметричної моделі (2) описує їх циклічну структуру як з фазовими порушеннями, так і без них [7] і тому має для практики аналізу сонячної циклічності цікаві властивості. Окрім того, воно певною мірою об'єднує ідеї суперпозиції гармонік Вольфа [6] і еруптивності Вальдмайера [23]. Відносно представлення (2) можна сказати, що в його основі лежить стійкість форми циклів як найважливішої характеристики періодичності, ритмічності та циклічності з тим істотним доповненням, що від гіпотези еруптивності тут ефективно використовується властивість перервності.

Хоча ступінь стиснення істотної інформації, який забезпечується представленням (2), є відносно невеликим, воно має переваги в обробці, інтерпретації результатів і, що найважливіше в контексті обговорюваних проблем, в збереженні інформації про тонку структуру сонячних циклів та зміну їх фаз.

Оптимальне розбиття часового ряду на цикли, їх трипараметричне нормування [7] дозволяє в рамках моделі (2) ефективно виділити їх ритмічну, в сенсі роботи [11], складову з квазидетермінованими адитивним

$$w_{jk} = m_k + v_{jk}, \quad (5)$$

мультиплікативним

$$w_{jk} = m_k \zeta_{jk} \quad (6)$$

або адитивно-мультиплікативним

$$w_{jk} = (m_k + v_{jk}) \zeta_{jk} \quad (7)$$

компонентами. Тут w_{jk} — апроксимовані усередненим (еталонним) циклом 11-річні цикли числа Вольфа, а v_{jk} і ζ_{jk} — випадкові з нульовими середніми і, гіпотетично, квазидетермінованими складовими тонкої структури часового ряду.

Співвідношення (5), (6), (7) дають можливість ставити і розв'язувати задачі класифікації та ідентифікації інформативних ознак мікро- і макро-структури циклічних часових рядів, будувати поля інформативних ознак належності їх до певних класів.

4. ОЦІНЮВАННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ

Обробку і аналіз емпіричних даних природно розпочинати в рамках найпростіших уявлень про їх структуру, при необхідності ускладнюючи їх. Для геліофізичних даних з циклічною структурою такі уявлення дає співвідношення (5). В цьому випадку процедура обчислення зводиться до усереднення k ординат кожного з j циклів за співвідношенням

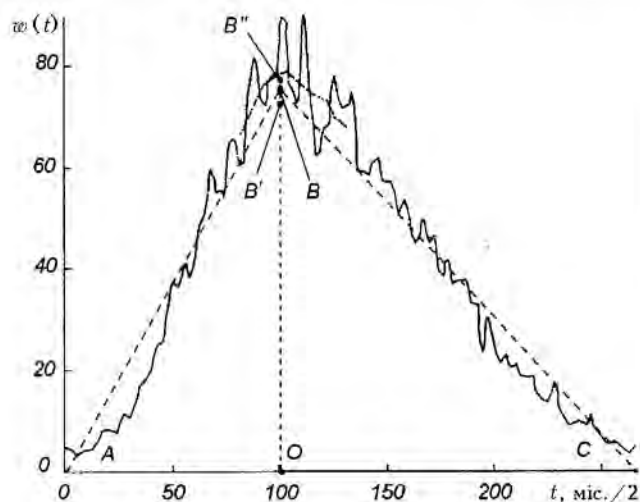
$$w'_k = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n w_{jk}, \quad (8)$$

де w_{jk} — ординати трикратно нормованих (за потужністю S , тривалістю T і асиметрією α) циклів середньомісячних чисел Вольфа.

Аналіз оцінки (8) показує [8], що вона містить явно виражену тонку структуру і в центральній частині циклу утворює його двовершинність. Переважаючим фактором збільшення амплітуди останньої є підвищення точності врахування зміни фаз усереднених циклів. Різницеве диференціювання цієї кривої безпосередньо виявляє квазіперіодичну складову з періодом $T = (11.6 + 0.5)$ міс. Другою за інтенсивністю, яка міститься в кривій w'_k , є близька до нівірної складова. Остання має значну інтенсивність і помітну стійкість на значній частині циклічної кривої.

Уточнену емпіричну оцінку кривої w'_k одержано з використанням алгоритмів, що дозволяють враховувати внутріциклічні зміни макропараметрів 11-річного сонячного циклу і при обробці використовувати подвоєння масиву вихідних даних [12]. Перше досягається за допомогою зведення вихідних різносиметричних циклів до однакової симетрії. Друге здійснюється з метою зменшення ефекту згладжування, який дають алгоритми зведення тривалості вихідних циклів та їх віток росту і спаду до середніх значень [7].

Одержану оцінку кривої усередненого 11-річного циклу середньомісячних чисел Вольфа з подвоєним масивом даних і з параметрами відповідно $T =$



Тонка структура 11-річного циклу сонячної активності, усередненого за 20 циклами середньомісячних чисел Вольфа з подвоєним масивом даних

$\approx 266 \text{ міс./2}$ і $q = 20$ зображено на рисунку. Як видно, інтенсивність тонкої структури циклу залежить від його фази, досягає максимуму в його центрі і є складнішою порівняно з описаною раніше [7].

Наочне уявлення про реальність тонкої структури емпіричної оцінки $w'(t)$ можна знайти в роботі [12], де вона використовується як апроксимуюча функція для спостережуваних середньомісячних чисел Вольфа. Похибка цієї апроксимації дуже залежить від фази циклу. Якщо на периферії циклів ця похибка досягає 100 %, то в центральній його частині на інтервалі біля п'яти років середня квадратична похибка становить уже близько 20 %. Якщо наведеною на рисунку кривою апроксимувати середньомісячні «стаціонаризовані» (з відсіченою адитивно-нестационарною складовою [13, 14] числа Вольфа, то вказаний рівень похибок знижується до 10 %, що вдвічі менше від перепадів пікових значень місячних флуктуацій кривої $w(t)$. Такий же 10-відсотковий рівень середньої квадратичної похибки досягається при апроксимації середньомісячних згладжених чисел Вольфа, якщо апроксимаційною функцією обрати оцінку $w(t)$, розраховану за згладженими середньомісячними числами Вольфа з подвоєним масивом даних. В останньому випадку середня квадратична похибка має добре виражений локальний мінімум, який досягає 5-відсоткового рівня [13].

Вказаний мінімум практично збігається з локальним мінімумом максимальної глибини близької до річної складової в центральній частині кривої $w(t)$. Цей локальний мінімум характеризує, по су-

ті, зону локальної стійкості тонкої структури усередненого 11-річного циклу середньомісячних чисел Вольфа. Якщо абсцису цього локального мінімуму позначити через k_0 , то її функціональний зв'язок з абсцисою k , значення якої для вітки спаду відраховуються від її кінця, можна описати співвідношенням

$$k_j = \frac{k_0 \alpha_j T_j}{T'_c} \quad (9)$$

або

$$k'_j = \frac{k_0 (1 - \alpha_j) T_j}{(T_c - T'_c)} \quad (10)$$

відповідно для вітки росту і спаду ($T_c - T'_c$), де k_0 і k'_j — абсциси ординат локального мінімуму в усередненому і вихідному циклах відповідно.

5. ТОЧНІСТЬ ВИБОРУ ПАРАМЕТРА ВИСОТИ

Відхилення пікових значень усередненого циклу в епоху максимуму сонячної активності від ковзного середнього на інтервалі, що дорівнює 13 міс, показаного на рисунку пунктиром, досягає близько 20 %. В умовах стійкості цих піків практично на всій множині спостережуваних циклів (див. рис. 4 в роботі [12]) їх заміну на ординати ковзної середньої при вирішенні задач апроксимації і прогнозування не можна трактувати інакше як інформаційним розтрипуванням. Дійсно, чому варто надавати перевагу як оцінці висоти циклу, усередненій за 13-ма значеннями ординат при невизначеній абсцисі порівняно з оцінкою ординати, отриманої усередненням 20 і більше значень, взятих з статистично стійких локальних зон, взагалі кажучи, незалежних 11-річних циклів середньомісячних чисел Вольфа? А з іншого боку, як обгрупувати вибір характеристики висоти 11-річного циклу чисел Вольфа, коли значна частина рівнів за інтенсивністю піків кривої припадає не лише на епоху максимуму але і на вітку спаду? В рамках розвинутого підходу ця задача розв'язується з допомогою простої геометричної побудови [10].

Побудуємо (див. рисунок) трикутник з основою, рівною тривалості усередненого циклу T і вершиною в точці $B(T, 2S/T)$, абсциса якої дорівнює тривалості вітки росту цього циклу, а ордината — подвійний потужності S розділеної на його тривалість T .

Аналогічно можна побудувати трикутники з основами, рівними тривалості вітки росту T' і спаду

T'' циклу з вершинами $B(T', 2S'/T')$ і $B(T'', 2S''/T'')$, де S' і S'' – потужності віток росту і спаду усередненого циклу середньомісячних чисел Вольфа.

В результаті описаних геометричних побудов на границі віток росту і спаду (а точніше на лінії, що має абсцису початку вітки спаду) усередненого 11-річного циклу середньомісячних чисел Вольфа визначимо три ординати, які позначено на рисунку буквами $OB' = 72$, $OB = 75$, $OB'' = 77$ і які мають переваги як характеристики висоти циклу і його віток росту і спаду порівняно з ковзним середнім $R(c) = 82$ відносних одиниць. Неважко помітити, що ордината OB з точністю до обрахунків є фактично середнім арифметичним ординат OB' і OB'' , а ковзна середня характеризує лише висоту вітки спаду.

6. КІЛЬКІСНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ І УЗАГАЛЬНЕННЯ ЗАКОНУ ШВАБЕ–ВОЛЬФА

Перевага оцінки OB як характеристики висоти 11-річного циклу чисел Вольфа пояснюється двома обставинами. По-перше, оцінка OB , як зазначалось вище, має належне обґрунтування, а по-друге, її використання дає можливість падати кількісну інтерпретацію закону Швабе–Вольфа [10, 22], який в цьому випадку набуває функціональної залежності

$$T = \frac{2S}{R}. \quad (11)$$

Це означає, що числа Вольфа змінюються циклічно з постійною середньою тривалістю, рівною його подвійній середній потужності, поділеній на середню висоту.

Для випадку неусереднених параметрів ця залежність виконується на цюріхських даних з середньою квадратичною похибкою, що не перевищує 3 % [9, 22].

Закону Швабе–Вольфа як емпіричній фундаментальній закономірності сонячної активності можна падати і загальнішої форми:

$$\frac{RT_\gamma}{S} = 2 \pm \sigma_\gamma, \quad \gamma = 1, 2, 3, \quad (12)$$

де значення індексів означають належність параметра циклу або його віткам росту і спаду відповідно, встановлені різниці в оціпованні висоти останніх входять відповідно в похибки σ_γ .

ВИСНОВОК

Суттєвим фактором ефективності вибраного способу виділення і аналізу мікро- і макроструктури середньомісячних індексів сонячної циклічності і аргументації висновків, що витікають з наведених матеріалів, є та обставина, що форма 11-річних циклів разом з їх тонкою структурою трактується статистично стійкою в силу природи явища, а їхня внутрішньоциклічна і вікова мінливість усувається трипараметричним нормуванням. А важливою особливістю підходу, що використовується для обробки даних з циклічною структурою з метою апоксимації і прогнозування, є можливість простими засобами виділяти закономірності статистичних і функціональних зв'язків між параметрами цієї структури у вихідних і усереднених циклах відповідно.

1. Васильева Г. Я., Кузнецов Д. А., Шпитальная А. А. и др. К вопросу о годичных вариациях солнечной активности // Солнечные данные. – 1974. – № 4. – С. 96–110.
2. Витинский Ю. И. К вопросу о годичной составляющей вариаций солнечной активности // Солнечные данные. – 1973. – № 6. – С. 82–95.
3. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: Наука, 1973. – 258 с.
4. Витинский Ю. И. О годичной вариации сильных флуктуаций чисел Вольфа // Солнечные данные. – 1974. – № 4. – С. 111–118.
5. Витинский Ю. И., Исханов Р. Н. К вопросу об определении эпох экстремумов циклов солнечных пятен // Солнечные данные. – 1960. – № 1. – С. 70–75.
6. Витинский Ю. И., Колецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
7. Войчишин К. С. Анализ амплитудно-фазовых нарушений ритмической структуры чисел Вольфа // Астрон. журн. – 1978. – 55, вып. 6. – С. 811–822.
8. Войчишин К. С. Особенности тонкой структуры 11-летней цикличности солнечной активности // Астрон. журн. – 1981. – 58, вып. 1. – С. 167–173.
9. Войчишин К. С. О внутренней согласованности параметров солнечного цикла и предвычислении его ординат. // Астрон. журн. – 1987. – 64, вып. 3. – С. 617–626.
10. Войчишин К. С. О возможности выявления функциональных зависимостей в циклической структуре гелиофизических индексов // Пробл. упр. и информатики. – 1997. – № 2. – С. 120–125.
11. Войчишин К. С., Драган Я. П. Пример образования периодически коррелированных случайных процессов // Радиотехника и электроника. – 1973. – 18, № 9. – С. 1957–1960.
12. Войчишин К. С., Стодилка М. И. О статистической устойчивости солнечной цикличности // Астрон. журн. – 1982. – 59, вып. 6. – С. 1171–1183.
13. Войчишин К. С., Стодилка М. И. О стационаризации месячных флуктуаций гелиофизических индексов // Астрон. журн. – 1984. – 61, вып. 5. – С. 976–984.

14. Войчишин К. С., Стодилка М. И. Временная структура цикличности среднемесячных наблюдаемых чисел Вольфа. — Львов, 1985. — 48 с. — (Препринт / АН УССР. Физ.-мех. ин-т, N 99).
15. Кандаурова К. А. Статистический анализ и прогноз цюрихского ряда чисел Вольфа с исключенной регулярной частью // Солнечные данные. — 1971. — № 11. — С. 80—89.
16. Кожевников Н. И. Годовая составляющая в спектре активности Солнца // Астрон. циркуляр. — 1978. — № 1018. — С. 2—4.
17. Кожевников Н. И. Годовая составляющая активности Солнца // Солнечные данные. — 1979. — № 5. — С. 91—96.
18. Музалевский Ю. С., Жуков Л. В. О флуктуациях месячных чисел Вольфа // Астрон. журн. — 1970. — 47, вып. 3. — С. 541—543.
19. Оноприенко В. И. Проблема цикличности в теоретической геологии // Геолог. журн. — 1972. — № 32. — Вып. 6. — С. 3—14.
20. Чистяков В. Ф. Циклическая деятельность Солнца. — Владивосток: Дальневосточное книжное изд-во, 1973. — 124 с.
21. Эйгенсон А. М. О многомерной классификации 11-летней цикличности солнечной активности // Вестн. Львов. ун-та. Сер. астрон. — 1981. — № 56. — С. 22—24.
22. Voichishin K. S. The procedure of detecting the general regularities of the time structure of cyclic signals // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1994. — 4. — P. 188—294.
23. Waldmeier M. Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve // Astron. Mitt. — 1935. — S. 106—294.

ANALYSIS OF MICRO-MACROSTRUCTURE REGULARITIES IN THE CYCLIC RECURRENCE OF THE SOLAR ACTIVITY

K. S. Voichyshyn

We analyze the current status research on the thin structure of heliophysical cyclic time series. Methodological difficulties in picking out and corroboration of the reality of an annual component in the monthly fluctuations of Wolf numbers are noted. Relations between the parameters are studied. The results of processing of the average monthly Wolf numbers, which form the basis for the quantitative interpretation and generalization of the Schwabe—Wolf law, are presented. Arguments which corroborate the relationship between the microstructure and macrostructure of the time series of solar activity indices are given.

УДК 621.372.542

Імітаційне моделювання, методи теорії хаосу та фракталів в космічних дослідженнях

Б. В. Кисіль

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98.

Розглядаються підходи, математичні моделі, алгоритми синтезу зображень, завад та їх взаємодія. Отримано «реальні» зашумлені модельні зображення та шуми (спекл-шум, тепловий шум, турбулентність атмосфери), які з'являються в задачах дистанційного зондування земної поверхні та інших космічних об'єктів. Представлено графічне відображення складних об'єктів та фізичних процесів, які виникають в задачах космічних досліджень. Розроблені алгоритми базуються на імітаційних моделях, теорії хаосу та фрактальних зображеннях.

Дистанційне зондування земної поверхні є однією з важливих задач космічних досліджень. В останні роки методи, засоби та системи дистанційного зондування знаходять широке та різностороннє застосування в дослідженнях природних ресурсів, екології, військовій сфері, дослідженнях космічних об'єктів. Провідні країни світу та космічні агентства приділяють цим проблемам велику увагу.

Важливе місце в задачах зондування займають радіолокаційні системи з синтезованою апертурою (РСА), розміщені на авіаційних та космічних носіях. Такі РСА широко використовуються в геології (розвідка корисних копалин, в тому числі морських газових та нафтових родовищ), екології (контроль оточуючого середовища, виявлення забруднень), сільському господарстві (землевикористання, прогнозування урожайності), тематичній картографії (визначення складу та стану рослинності, класифікація покриття земної поверхні та населених областей), океанології, гідрології і багатьох інших галузях людської діяльності [4].

Основним джерелом інформації при вирішенні задач дистанційного зондування засобами РСА є радіолокаційні зображення. Однією з істотних особливостей таких зображень є наявність шуму

(завад). Причини виникнення шуму на зображенні можуть бути різними, і важливим є вивчення цих причин, встановлення природи шуму та розробка методів і засобів його подавлення.

Інтерес до моделювання зображень викликаний бажанням отримувати засобами комп'ютерного моделювання: а) «реальні» зашумлені та «підписані» зображення, які формуються технічними засобами реєстрації, б) зображення складних фізичних об'єктів та процесів в просторово-часових координатах, котрі важко, а часом і неможливо, отримати технічними засобами реєстрації. Перша причина зумовлена в більшості випадків практичними задачами обробки та розпізнавання зображень (дистанційне зондування, гідро-, радіо-, лазерна локація, технічне бачення і т. д.), сформованих зображень технічними системами реєстрації. Такі дослідження дають змогу, знаючи природу формування зображення, синтезувати оптимальні фільтри та алгоритми відновлення зображень для отримання «ідеальних» зображень [5]. Друга причина має на меті комплексне вивчення та дослідження механізмів формування зображень з подальшим переходом від інформаційних механізмів до фізичних та їх подальшої інтерпретації.

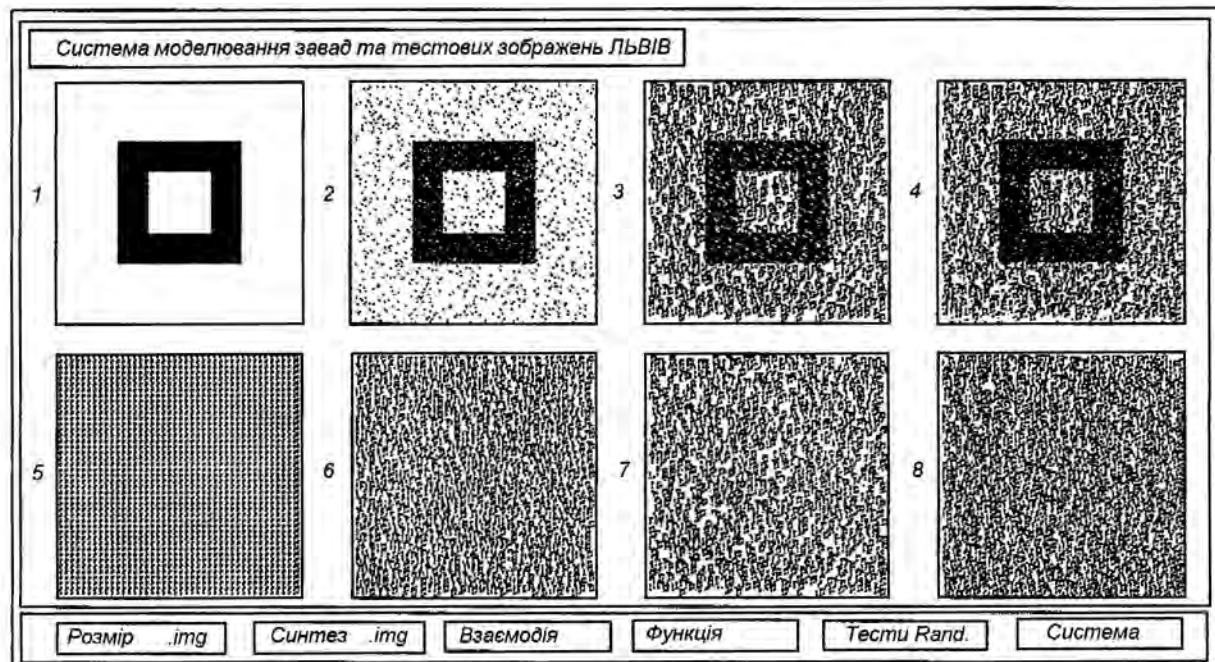


Рис. 1. Моделювання зображень, завад, текстур та їх взаємодії

Зображення в процесі їх формування звичайно вироджуються випадковими завадами або шумами. При синтезі алгоритмів, орієнтованих на роботу з реальними об'єктами (зображеннями), необхідно враховувати виродження, які вносяться як системою формування зображень (різні пристрої прийому зображень), так і системою, яка породжує зображення. Найбільш повний опис таких вироджень – це модель взаємодії завади з зображенням та модель самої завади [6]. Якщо виходити із статистичної моделі завади, то її статистичні характеристики часто можна визначити на основі структури та характеристик відповідних систем формування зображень. Наприклад, шум зернистості фотоплівки в фотографічних системах визначається її типом та режимом фотохімічної обробки, шум в радіотелевізійних системах – потужністю радіосигналу в каналі зв'язку, в голографічних системах – роздільною здатністю приймального пристрою.

Найбільш розповсюдженим видом завад на зображеннях є адитивний, статистично незалежний від відсигналу флуктуаційний шум.

Модель адитивного шуму використовується тоді, коли сигнал на виході системи або якому-небудь проміжному етапі його перетворення може розглядатися як сума корисного сигналу та деякого випадкового сигналу (шуму). Так, наприклад, описується дія зернистої фотоплівки, флуктуаційний шум в радіотехнічних системах і т. п.

Імпульсний шум характерний для систем передачі зображень радіоканалами з використанням нелінійних видів модуляції сигналу (частотної модуляції, часово-імпульсної модуляції), а також для цифрових систем передачі та зберігання зображень.

При мультиплікативній моделі корисний сигнал помножується на випадковий сигнал. Такою моделлю характеризуються дії шуму фотоелектронних помпуювачів, шуму дифузності в когерентно-оптичних та інших голографічних системах.

Модель спекла охоплює статистичний опис сукупності пікселів, які створюють деяке радіолокаційне зображення (РЛЗ), а також вид взаємодії шуму і сигналу від об'єкта спостереження [1].

Статистична модель «класичного» спекла базується на представленні елемента роздільної здатності радіолокаційної станції з синтезованою апертурою (РСА) у вигляді сукупності великої кількості випадкових незалежних елементарних точкових відбивачів з приблизно однаковими розсіювальними властивостями і рівномірно розташованими фазами відбитого сигналу. В цьому випадку статистика спекла задовольняє добре відомий релеевський (а для потужності – від'ємний експоненційний) закон розподілу [2]. На рис. 1 наведені приклади зашумлених зображень (2–4).

В багатьох випадках на більшій частині зображень природних об'єктів (ландшафт, ліси, поля) відсутні суттєві деталі. В цих областях зображення

часто можна характеризувати до деякої міри регулярним (можливо, випадковим) повторенням певної структури, розмір якої набагато менший від розміру самого зображення. Зображення таких областей називають текстурями.

При аналізі зображень часто використовують синтез текстур. З одного боку, використовують синтезовані текстури для заміни вироджених областей зображення, з іншого — для визначення текстурних ознак зображення — спектральні, статистичні та просторові характеристики природних об'єктів (рослинний покрив поверхні).

Основний підхід до синтезу текстур полягає в створенні деякого базового елемента текстури (шаблону) і повторенні цього елемента по всій площині зображення. Повторення шаблону можна здійснювати регулярно (регулярна текстура) та будь-яким іншим, включаючи і випадковий спосіб. Коли виникає часткове (повне) накладання шаблонів на певній ділянці зображення, задають функцію взаємодії [3]. Приклади синтезованих текстур зображені на рис. 1 (5 — регулярна текстура, 6, 7 — випадково змінені шаблони на один і три пікселі відповідно, 8 — випадкова текстура, тобто шаблони за рівномірним законом покривають поле зображення).

Досить недавно було виявлено, що деякі комп'ютерні системи моделювання фізичних процесів, а також чисто математичних об'єктів ведуть до формування зображень, дуже близьких до реальних зображень природних об'єктів і процесів. Самі природні об'єкти і процеси можуть мати різну фізичну суть, породжуватись різними фізичними процесами, але зображення, які вони породжують, часто мають однакову інформаційну природу і можуть породжуватись однією комп'ютерною моделлю. Такі зображення, як правило, мають складну і тонку структуру (берегова лінія моря, дельти рік, гірський ландшафт, коралові покриття, текстури земної поверхні, вкритої рослинністю, зображення нейроструктури мозку, лімфатичної та кровоносної системи живого організму, процеси дифузії та осадження металів і т. п.).

Неабиякий інтерес до моделювання таких зображень викликає ще й тим, що механізми, покладені в основу моделювання, можуть дати можливість вивчати та розкривати фізичні механізми самих природних процесів, які породжують зображення (еволюція природних утворень — земної поверхні, внутрішніх пластів Землі, рослинного та тваринного світу; хімічних та біохімічних структур; кристалів).

З точки зору інформаційних технологій таке моделювання дасть змогу комплексно описувати та

стискати великі обсяги інформації, які несуть такі зображення для задач ефективного зберігання та передачі даних.

І останнє, такі дослідження і практичні реалізації та експлуатації комп'ютерних моделей дають можливість глибше проникнути сучасним інформаційним технологіям в нові галузі знань (природоохорона, екологія, медицина, геологія) та суттєво збагатити і відкрити нові природні та суспільні технології.

Донедавна вважалося, що в принципі можна досягнути повного передбачення. Для цього необхідно тільки зібрати і обробити достатню кількість інформації.

Таку точку зору різко змінило відкриття, яке показало, що прості детерміновані системи з малим числом складових компонентів можуть породжувати випадкову поведінку. Така випадкова поведінка має принциповий характер, її неможливо позбутися, збираючи більше інформації. Породжену таким чином випадковість прийнято називати хаосом. Хаос може мати детерміністичний характер, в ньому є порядок, а в основі хаотичної поведінки лежать геометричні структури, які створюють випадковість.

Відкриття хаосу викликало до життя новий метод наукового моделювання. З одного боку, він ввів нові принципові обмеження на можливість прогнозування, з іншого — закладений в хаосі детермінізм показав, що багато випадкових явищ більш передбачувані, ніж вважалося раніше. Хаос дозволяє знаходити порядок в таких різних системах, як атмосфера, хімічні реакції, серцево-судинна система, наплення матеріалів, ландшафт і т. д.

Поняття хаосу відноситься до теорії динамічних нелінійних систем. Ці системи включають поняття стану та динаміки (правила, що описують еволюцію чи розвиток, функціонування системи в часі). Динаміку описують в просторі станів — фазовому просторі, в якому координатами є компоненти стану системи. Таким чином, фазовий простір дає можливість описувати динамічні системи, представляючи їх поведінку в геометричній формі. Відображення певних стабільних поведінок системи на фазовий простір називають атрactorами, і для детермінованих нехаотичних систем в геометричній формі вони представляються нерухомими точками, граничними точками, граничними циклами та торами. Для систем з хаотичною поведінкою атрactorи мають складну геометричну структуру, в багатьох випадках близьку до фрактальної. Виявлено досить прості системи з трьома ступенями вільності, які поводять себе чисто випадково і мають хаотичну поведінку.

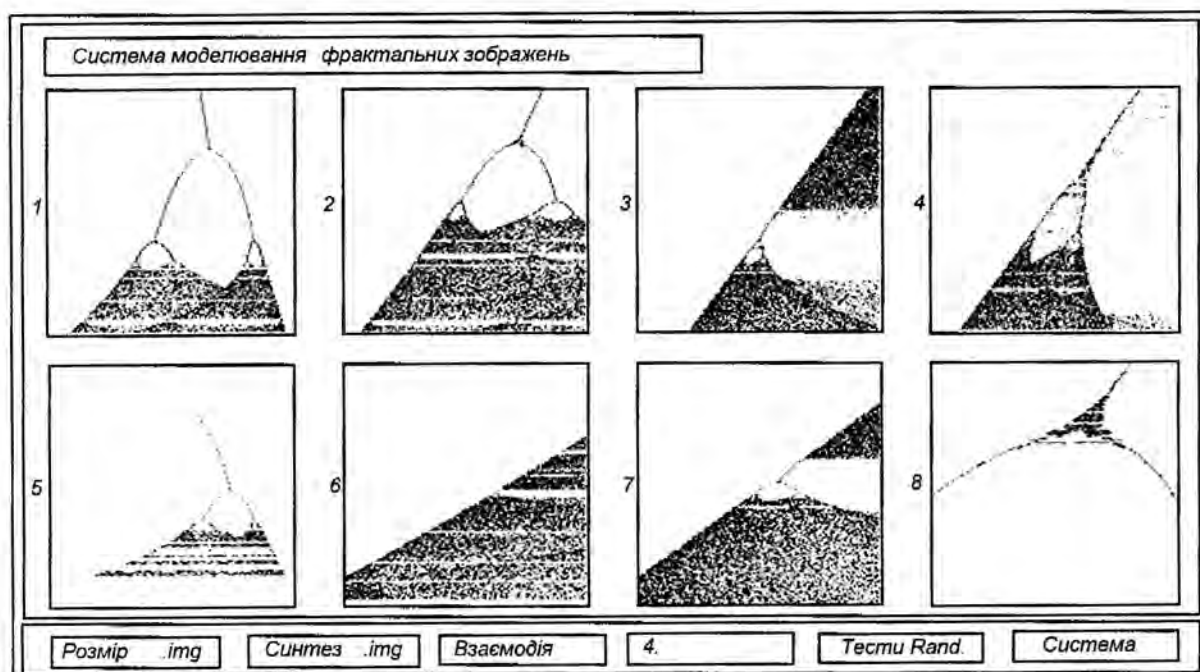


Рис. 2. Моделювання атракторів нелінійних динамічних систем

тичний характер. Основний механізм, що викликає хаотичну поведінку в таких системах, полягає в тому, що мікроскопічні збурення накопичуються і впливають на макроскопічну поведінку.

Представлення поведінки динамічної системи у фазовому просторі графічним об'єктом дозволяє використовувати сучасний апарат фрактальної геометрії для вивчення тонкої структури як самої системи, так і її поведінки. Це також дає можливість по-новому трактувати елементи випадковості (хаосу) в поведінці системи, виробляти нові нестандартні методи прогнозу та оцінки стану і поведінки системи.

Основою для моделювання зображень, що представляють аттрактори таких систем, є ітераційний процес $X = F(X, R)$, де R — параметр системи, X та R — векторні величини і F — відповідно векторна функція. На рис. 2 наведені приклади моделювання стабільних станів для скалярних функцій $x = rx(1 - x)$ та $x = rx(1 - x^2)$: у вікнах з номерами 1 та 5 показані початкові зображення, а у вікнах 2–4 та 6–8 зображення є збільшенням вибраних фрагментів приблизно у 10 разів (наступний фрагмент відносно попереднього). По горизонталі відкладено значення $0 \leq x \leq 1$, а по вертикалі — значення параметра $2 \leq r \leq 4$.

Коротко зупинимися на інших моделях, які реалізовані у вигляді програмних систем і знайшли своє практичне використання у розв'язанні при-

кладних задач. Основні з них: моделювання взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками; моделі агрегації, обмеженої дифузії, а також моделі, засновані на генерації фрактальних зображень.

Найпростішою моделлю взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками можна вважати двомірну ґратку, у вузлах якої є елементи, що мають чотири (зліва, справа, знизу, зверху) або вісім (включені діагоналі) сусідів, пов'язаних з ними певною функціональною залежністю і змінюють свій стан в залежності від стану сусідів. В обмежених полях, на відміну від тора, на границях задають пограничні умови. Процес моделювання полягає в генерації повного розподілу станів елементів поля, введення ефекту (ісоднорідності) локальних зв'язків, функції зміни стану та «спрацювання» елементів поля, тобто дискретної зміни станів елементів (приклад моделювання показані на рис. 3).

В цьому прикладі досліджена наступна функція взаємодії: якщо в околі елемента P_{ij} (в даному випадку околі — це елементи $P_{i-1,j}$, $P_{i+1,j}$, $P_{i,j-1}$ та $P_{i,j+1}$) є елемент із значенням $P_{i,j+1}$ (стан елементів — цілі числа), тоді значення P_{ij} збільшується на одиницю. Рецепторне поле реалізоване у вигляді тора, і функція взаємодії не є рекурсивною відносно рецепторного поля, тобто околі будь-якого елемента не враховує зміни, які вже відбулися в ньому

на даній ітерації. Ця функція рекурсивна відносно ітерації.

Такі моделі взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками можуть використовуватися для дослідження процесів теплопередачі, поширення напруженості в матеріалах, станів рідин та газів при космічних орбітальних експериментах.

Іншою різновидністю подібних моделей є моделі агрегації, обмеженої дифузією. Клас таких моделей базується на принципах броунівського руху і може бути ефективно використаний для моделювання росту кристалів, процесів наплення металів, електролізу, утворення сумішей, розвитку органічних популяцій, які проходять в умовах невагомості.

Розглянемо деякі підходи до синтезу зображень агрегації, обмеженої дифузією, що базуються на моделях випадкового руху (одним із видів такого руху є броунівський рух). Самі зображення агрегації та процес їх генерації будемо розглядати на матриці цілих чисел

$$M = \{m_{ij}\}, i = 1, \dots, n_1, j = 1, \dots, n_2.$$

Нехай задано три пемісті множини пар індексів:

$$A_0 = \{a_k\} = \{(i, j)\}, \quad C = \{c_q\} = \{(i, j)\},$$

$$G = \{g_r\} = \{(i, j)\}$$

$$k = 1, \dots, K, q = 1, \dots, Q, r = 1, \dots, R.$$

Множину A_0 будемо називати початковим станом (центром) агрегації. Нехай m_{ij} , де $(i, j) \in A_0$, приймають певні цілі значення.

На множині C задана імовірнісна міра P_c . Множину G назвемо границею агрегації.

З будь-якою парою $\{i, j\}$ індексів матриці M будемо пов'язувати множину T пар ідексів $\{i_1, j_1\}$ (околі точки (i, j) із заданою імовірнісною мірою P_t). Випадковий рух точки (перехід з місця (i, j)) визначається околом T та імовірностями переходів P_t . Для коректності алгоритму генерації агрегації необхідна умова замкнутості G відносно випадкового руху точки та доступності елементів множини A з C . Ці умови полягають в тому, що будь-яка точка, починаючи свій рух з C , досягне G або A за скінчене число кроків.

Таким чином, процес генерації агрегації A_1 , обмеженої дифузією, визначається сімкою $\langle M, A_0, C, P_c, G, T, P_t \rangle$ та наступним алгоритмом:

1. $A = A_0$.
2. З множини C згідно з P_c визначається пара (i, j) .
3. Відносно (i, j) згідно з P_t визначається нове положення точки (i_1, j_1) з множини T .
4. Якщо $(i_1, j_1) \in G$, тоді повернутися до кроку 2. Точка вийшла за межі поля генерації.
5. Якщо $(i_1, j_1) \in A$, тоді $A = A \cup (i, j)$; перехід на п. 2.
6. $(i, j) = (i_1, j_1)$; перехід на п. 3.

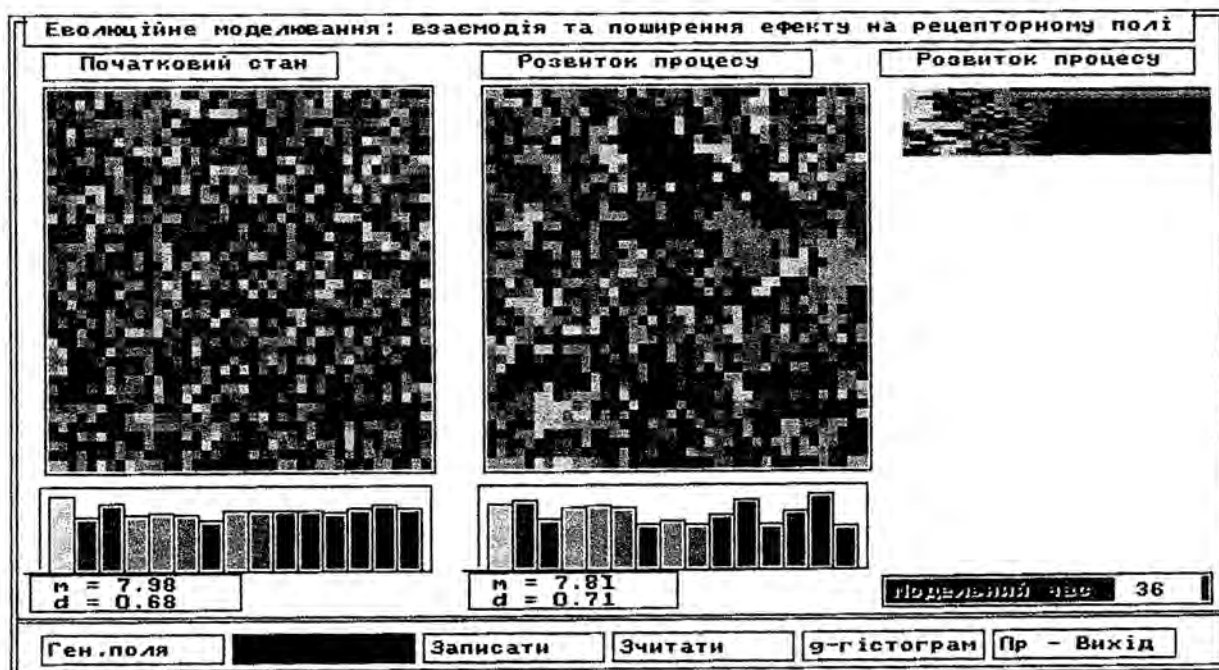


Рис. 3. Моделювання взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі

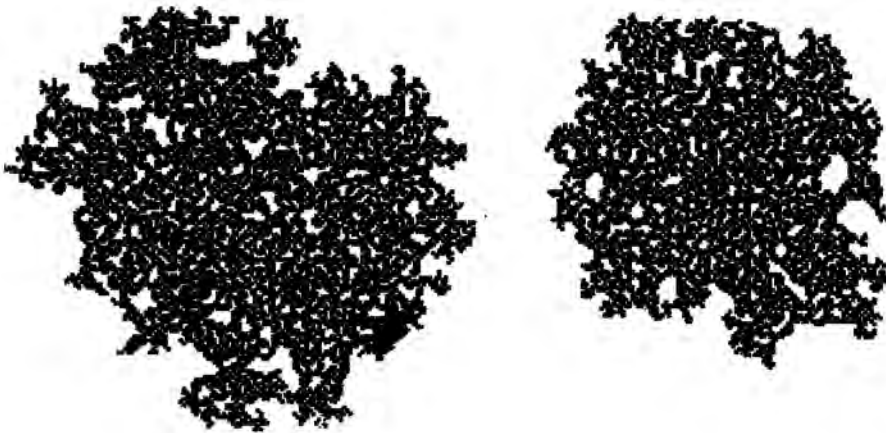


Рис. 4. Моделювання агрегацій обмежених функцією

Завершення генерації можна задати будь-якою внутрішньою умовою алгоритму або ззовні.

Інтерпретація елементів $m_{i,j}$, $(i, j) \in A$, може бути довільною. Це можуть бути одиниці, і коли всі $m_{i,j}$ рівні нулю, то агрегація A буде представлена бінарним зображенням. Якщо інтерпретувати $m_{i,j}$ як порядковий номер пікселя, що поповнює агрегацію, або «час» досягнення точки агрегації, то можна отримувати півтонові чорно-білі або кольорові зображення. В прикладах, наведених нижче, $m_{i,j}$ набуває значень нормованого «часу» досягнення точки агрегації; на екрані маємо кольорове зображення, а при друку — псевдопівтонове.

Розроблена програмна система дає широкий набір засобів такого моделювання (приклади моделювання на рис. 4).

Фрактали — це математичні об'єкти, які, на відміну від традиційних геометричних фігур цілої розмірності (лінія, площина) мають дробову розмірність. Фрактальні зображення, як правило, інваріантні відносно масштабу, мають складну і тонку структуру. Ці властивості дозволяють добре описувати зображення природних об'єктів: берегова лінія моря, дельти рік, гірський ландшафт, коралові покриття, текстури земної поверхні, вкритої рослинністю і т. п. Використання методики синтезу фракталів дозволяє компактно описувати та ефективно синтезувати зображення складних природних об'єктів і процесів. Ця властивість може використовуватися при кодуванні, зберіганні та передачі радіолокаційних зображень дистанційного зондування Землі.

Синтез фрактальних зображень, що базується на генерації множини Мандельброта, базується на ітерації $z = f(z, c)$, z, c — комплексні числа, c —

параметр, $z_0 = 0$. Для кожного значення c з фіксованого прямокутника на комплексній площині визначається збіжність чи розбіжність процесу ітерацій. Цей процес відображається на полі зображення з відповідною інтерпретацією кожної точки — збіжності, розбіжності, «час» розбіжності і т. п. Приклади таких зображень наведені на рис. 5 (1–8) для ітерації $z = z^2 + c$.

На сьогодні існує і використовується багато програмних систем моделювання, обробки та розпізнавання зображень. Такі системи експлуатуються у вигляді автоматизованих робочих місць, графічних станцій, процесорів зображень. Як правило, не проблемно-орієнтовані, тематично-орієнтовані системи як за програмним, так і апаратним забезпеченням. Вони охоплюють широкий спектр розв'язання практичних задач.

Розробка автором нової системи моделювання та обробки зображень має на меті наступне. По-перше, використати і програмно реалізувати сучасні передові досягнення світової та вітчизняної інформаційної теорії і технології в галузі моделювання та обробки зображень. Використати сучасні «модерні» методи моделювання, які не були традиційними в обробці зображень. По-друге, створити систему, яка стане високоінтелектуальним інструментом наукових прикладних досліджень. В склад системи буде введено засоби системного та експертного аналізу, апарат управління та підтримки баз знань.

Таким чином, в руках користувача ця система стане інструментом оперативної маніпуляції зображеннями, моделями, алгоритмами обробки зображень та знаннями, набутими усіма користувачами системи.

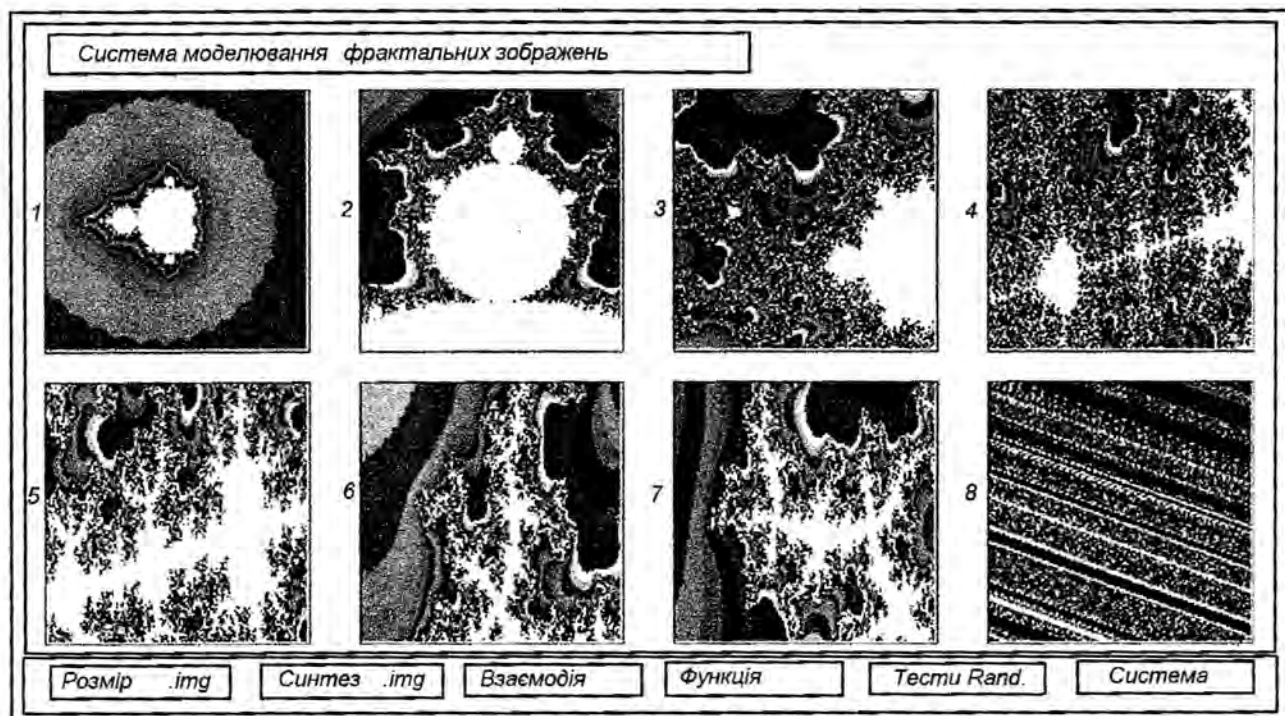


Рис. 5. Моделювання фрактальних зображень (множини Мандельбрата)

1. Ахметьянов В. Р., Пасмуров А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования земли. — М.: Радио и связь, 1987. — С. 70–81.
2. Белокуров А. А. Методы сглаживания спекл-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности. — М.: Радио и связь, 1990. — С. 26–35.
3. Грицьук В. В., Кисіль Б. В., Паленичка Р. М. Математическое моделирование фонов и их взаимодействие с локальными объектами. — Львов, 1979. — 52 с. — (Препринт/АН УССР. Физ.-мех. ин-т; N 46).
4. Карвер К. Р., Элаши Ш., Улаби Ф. Т. // ТИИЭР. — 1985. — 73, № 6. — С. 75–87.
5. Параллельная обработка информации. Параллельные методы и средства распознавания образов / Под ред. В. В. Грицька. — Киев: Наук. думка, 1986. — Т. 3. — 280 с.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 1. — 310 с.; Кн. 2. — 790 с.

IMITATIVE MODELLING AND METHODS OF CHAOS THEORY AND FRACTALS IN SPACE RESEARCH

B. V. Kysil'

Approaches, mathematical models, algorithms for synthesis of images, noises and their interactions are considered. We obtained «Real» noised model for the images and noises (speckle noise, thermal noise, noise caused by atmospheric turbulence) which appear in the distance sounding of the Earth surface and other space objects. A graphical representation of the complex objects and physical processes which present themselves in the space research is presented. The algorithms developed are based on imitation models, the chaos theory, and fractal images.

УДК 519.6

Спеціалізована ГІС для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону на базі даних дистанційного зондування Землі

Р. А. Бунь, М. І. Густі, В. І. Ліщенко

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 16.03.98

Будується математична модель кругообігу вуглецю для Карпатського регіону з урахуванням зв'язків з сусідніми районами. Для визначення низки параметрів моделі використовуються дані дистанційного зондування Землі. Відмічається, що концентрація вуглекислого газу в атмосфері є визначальним фактором парникового ефекту на даний час. Наводиться структура спеціалізованої геоінформаційної системи для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону.

ВСТУП

В час швидкого індустріального розвитку гостро постало питання охорони довкілля. Від природоохоронних заходів і зусиль в цьому напрямку значною мірою залежить майбутнє нашої планети. Останні десятиріччя активно здійснюється постійний екологічний моніторинг, при якому широко використовується дистанційне зондування Землі. Діють міжнародні програми комплексного дослідження планети (наприклад Mission to Planet Earth, Land Cover Use Change Program та ін.), в яких бере участь Україна, зокрема в рамках своєї програми космічних досліджень. Моніторинг також включає спостереження за концентрацією вуглекислого газу в атмосфері та моделювання біогеохімічного циклу вуглецю з метою прогнозування можливого впливу господарської діяльності на цей життєво важливий кругообіг.

Вуглець є складовою частиною органічної речовини. У великій кількості, переважно у формі вуглекислого газу, він міститься в атмосфері і здійснює постійний кругообіг. Даний біогеохімічний цикл піддається значному впливу антропогенних

факторів (спалювання викопного палива, зміни у землекористуванні, забруднення довкілля тощо [8]). Одним з наслідків господарської діяльності є так званий парниковий ефект, який загрожує глобальним потеплінням. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері на даний час є визначальним фактором цього ефекту. Згідно з багатьма оцінками (наприклад [9]) за індустріальний період (останні 150 років) концентрація CO_2 в атмосфері збільшилась від 275 ppm* до 351 ppm і продовжує постійно збільшуватись (приблизно на 1.4 ppm за рік). Серйозність цієї проблеми обговорювалася в грудні 1997 р. в Кіото (Японія) на зустрічі представників 166 країн – членів Конвенції зміни клімату. На цій підписано угоду про зменшення емісії вуглекислого газу в атмосферу до рівня, на 50–60 % нижчого за рівень на 1990 р. Тому актуальним є питання створення методів та засобів оцінки вуглецевого балансу** окремих регіонів і країн в цілому.

* ppm – parts per million (мільйонна частка).

** Вуглецевий баланс – різниця між кількістю CO_2 , що викидається в атмосферу в результаті господарської діяльності людини і життєдіяльності біоти, і кількістю CO_2 , що асимілюється рослинами для окремого регіону.

ОСОБЛИВОСТІ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

В Карпатський регіон України входять чотири західні області: Закарпатська, Львівська, Івано-Франківська і Чернівецька. Його особливість полягає в тому, що на порівняно невеликій території зосереджені різноманітні в екологічному відношенні зони. Поряд з унікальними гірськими масивами з недоторканою природою є вкрай забруднені техногеннонебезпечні райони. Від стану Карпатського регіону значною мірою залежить екологічний стан Європи.

Ця гірська екосистема відрізняється від рівнинних районів великою різноманітністю фізико-географічних умов і відіграє вона більш чітку і різноманітну захисну роль. Завдяки низькому економічному освоєнню людиною гірських районів в них краще зберігся природний характер ландшафтів. В регіоні зосереджений значний рекреаційний потенціал. Натомість структура природних систем лісових районів Карпат протягом агрокультурного періоду зазнала значних змін, що негативно вплинуло на їхню загальноекологічну стабільність. Про це свідчать небезпечні екологічні процеси, що загострились останнім часом: катастрофічні наводки, сільові потоки, вітровали та ерозійні процеси, які спричиняють значні матеріальні збитки економіці України.

Серед цілого спектру екологічних досліджень Карпатського регіону слід відзначити задачу оцінки його вкладу у вуглецевий баланс континенту та планети в цілому. Подібні дослідження до цього часу не проводилися. В цьому регіоні зосереджені великі лісові масиви, які часто називають «зеленими легенями Європи». Тому актуальними є питання створення математичних методів та відповідних інформаційних технологій для моделювання цього процесу на регіональному рівні, оцінки вуглецевого балансу регіону, відслідковування змін екологічного стану за час індустріалізації краю, прогнозування можливих наслідків безконтрольного втручання в природу і вироблення рекомендацій щодо охорони довкілля.

При створенні математичної моделі кругообігу вуглецю для Карпатського регіону виділяємо такі основні зони (див. рис. 1): сільськогосподарські угіддя; луки, пасовища і сінокоси; широколистяні ліси; хвойні ліси. Велика площа сільськогосподарських угідь зумовлена вкладом рівнинних районів. Вказана рослинність зосереджена на ґрунтах різних типів (від родючих чорноземів до вкрай бідних і вразливих у біологічному відношенні гірських ґрунтів) і в різних кліматичних зонах, які відрізняються температурним режимом, кількістю

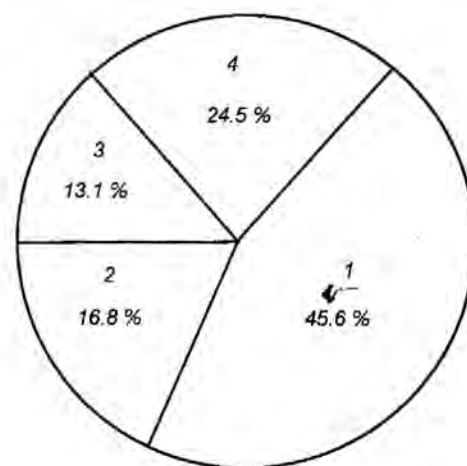


Рис. 1. Відносна площа основних зон Карпатського регіону: 1 — сільськогосподарські угіддя; 2 — луки, пасовища і сінокоси; 3 — широколистяні ліси; 4 — хвойні ліси

опадів та ін. Звичайно, поданий розподіл на зони є умовним, але він обумовлений тим, що для цих екосистем проводилися дослідження окремих біогеохімічних процесів, які є складовими частинами багатогранного процесу кругообігу вуглецю. Це відкриває можливості визначення багатьох параметрів математичних моделей.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КРУГООБІГУ ВУГЛЕЦЮ

При побудові математичної моделі кругообігу вуглецю на регіональному рівні за основу візьмемо підхід, запропонований в роботі [4]. Допускаємо, що регіональна система атмосфера — рослинність — ґрунт складається з чотирьох підсистем двох типів — трав'яних (1 і 2) та лісових (3 і 4), які взаємопов'язані між собою через атмосферу. Ці підсистеми відповідають наведеним на рис. 1 зонам. Кожну трав'яну підсистему представляємо рядом блоків: вуглець живої фітомаси рослини, вуглець підстилки і кореневих залишків, вуглець гумусу. Відповідно кожен лісову підсистему представляємо блоками: вуглець зеленої фітомаси, вуглець деревини і коренів живих рослин, вуглець підстилки і кореневих залишків, вуглець гумусу.

Схема кругообігу вуглецю на регіональному рівні має вигляд, зображений на рис. 2.

Побудуємо математичну модель біогеохімічного циклу вуглецю для Карпатського регіону. Позначимо через x_a вміст вуглецю в атмосфері над регіоном, $x_i^{(t)}$ — вміст вуглецю в окремих блоках i -ї

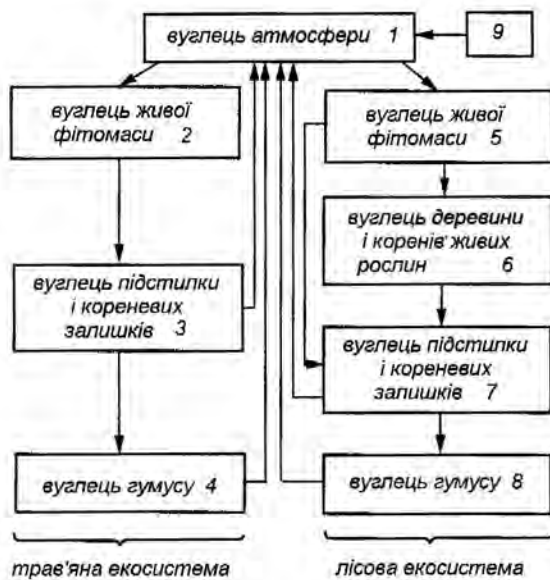


Рис. 2. Діаграма потоків вуглецю: 1 – атмосфера, 2–4 – складові трав'яних екосистем (відповідно, трава, підстилка і кореневі залишки, гумус); 5–8 – складові лісових екосистем (відповідно, листя, деревина та корені, підстилка та кореневі залишки, гумус); 9 – антропогенні та неантропогенні викиди вуглецю в атмосферу; 10 – сумарний потік вуглецю з сусідніх регіонів

трав'яної або лісової екосистеми. Відповідно $x_g^{(i)}$ – вміст вуглецю в окремих блоках трав'яних екосистем ($x_{gg}^{(i)}$ – в живій біомасі трави; $x_{gr}^{(i)}$ – в підстилці і кореневих залишках; $x_{gd}^{(i)}$ – в гумусі), $x_l^{(i)}$ – в окремих блоках лісових екосистем ($x_{ll}^{(i)}$ – в листі; $x_{lw}^{(i)}$ – в деревині і коренях живих рослин; $x_{lr}^{(i)}$ – в підстилці і кореневих залишках; $x_{ld}^{(i)}$ – в гумусі), причому $i = 1, 2$ для трав'яних, та $i = 3, 4$ для лісових екосистем. Позначимо через $v_g^{(i)}$ і $v_l^{(i)}$ швидкості надходження вуглецю з одного блоку в інший в межах окремих трав'яних і лісових екосистем відповідно. При цьому додаткові нижні індекси означають наступне: a – атмосфера, g – трава, l – листя, w – деревина і корені, r – підстилка і кореневі залишки, d – гумус. Так, позначимо $v_{ggg}^{(i)}$ – потік вуглецю з атмосфери регіону в фітомасу трав'яних рослин, $v_{ldd}^{(i)}$ – потік із гумусу лісової підсистеми в атмосферу і т. д. З урахуванням поданих на рис. 2 діаграм потоків диференціальні рівняння, які описують кругообіг вуглецю в регіональній системі атмосфера – рослинність – ґрунт, мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dx_a}{dt} &= \sum_{i=1}^2 (-v_{ggg}^{(i)} + v_{gra}^{(i)} + v_{gda}^{(i)}) + \\ &+ \sum_{j=3}^4 (-v_{lll}^{(j)} + v_{lra}^{(j)} + v_{lda}^{(j)}) + v + y, \\ \frac{dx_{gg}^{(i)}}{dt} &= -v_{ggg}^{(i)} + v_{ggr}^{(i)}; \\ \frac{dx_{gr}^{(i)}}{dt} &= -v_{ggr}^{(i)} - v_{grd}^{(i)} + v_{grr}^{(i)}; \\ \frac{dx_{gd}^{(i)}}{dt} &= -v_{gda}^{(i)} + v_{gdr}^{(i)}; \\ \frac{dx_{ll}^{(j)}}{dt} &= -v_{lll}^{(j)} - v_{llr}^{(j)} + v_{llr}^{(j)}; \\ \frac{dx_{lw}^{(j)}}{dt} &= -v_{lwr}^{(j)} + v_{lwm}^{(j)}; \\ \frac{dx_{lr}^{(j)}}{dt} &= -v_{lrr}^{(j)} - v_{lrd}^{(j)} + v_{lrl}^{(j)} + v_{lrr}^{(j)}; \\ \frac{dx_{ld}^{(j)}}{dt} &= -v_{lda}^{(j)} + v_{ldr}^{(j)}; \\ i &= 1, 2, \quad j = 3, 4. \end{aligned} \quad (1)$$

Перше рівняння системи відображає динаміку зміни вмісту вуглецю в атмосфері, друге, третє та четверте рівняння – в компонентах трав'яних систем, а рівняння з п'ятого по восьме – в компонентах лісових систем. У першому рівнянні v відображає притік вуглецю в атмосферу над регіоном з інших, не вказаних вище, джерел даного регіону. Такими можуть бути джерела як антропогенного, так і неантропогенного походження. Прикладом антропогенного джерела може служити вуглець, який виділяється в результаті інтенсивної господарської діяльності, а неантропогенного – лісові пожежі. Припускається, що потік v є відомим. В перше рівняння входить також змінна y – сумарний потік вуглецю з сусідніх регіонів.

Основні вирази для потоків, що фігурують в рівняннях (1), наведені в працях [5, 7]. Як приклад розглянемо потік, який відображає швидкість споживання вуглецю на побудову біомаси рослин трав'яної екосистеми. Цей потік апроксимують залежністю, яка відображає роль різноманітних факторів навколишнього середовища [5]:

$$v_{ggg}^{(i)} = k Z_i Z_c Z_r Z_u s_g^{(i)} \exp\left(-\frac{b}{x_{gg}^{(i)}}\right), \quad (2)$$

де $s_g^{(i)}$ – площа, зайнята трав'яною підсистемою, k і b – коефіцієнти, які враховують залежність продукційного процесу від біомаси рослинності.

Функції Z_r , Z_e , Z_t , Z_p , Z_u враховують вплив відповідно енергії сонячної радіації, концентрації вуглекислого газу в атмосфері, температури, забрудненості середовища і вологості ґрунту на динаміку споживання вуглецю з атмосфери.

Змінна y , що входить в рівняння (1), відображає потоки вуглецю з сусідніх регіонів. Значення цієї змінної пропорційне концентрації вуглецю в атмосфері над цими регіонами, тобто

$$y = \sum_{j=1}^M \Theta_j x_{jn}, \quad (3)$$

де Θ_j — коефіцієнти пропорційності, x_{jn} — вміст вуглецю в атмосфері над j -м сусіднім регіоном, M — число регіонів, які межують з досліджуванним. Значення цих коефіцієнтів можна визначити наступним чином. Нехай L_j — границя j -го регіону з досліджуванним. Таку границю доцільно проводити через мережу метеорологічних станцій, які здійснюють регулярні вимірювання напрямку та сили вітру. Тобто, можна допустити, що для кожної точки границі регіону відома так звана «роза вітрів» — векторна діаграма, яка характеризує режим вітру в даному місці за даними багаторічних спостережень. Довжини векторів, що розходяться з центра діаграми, пропорційні повторюваності та сили вітрів у цих напрямках. Суму векторів «рози вітрів» позначимо через ω . Цей сумарний потік є функцією часу (наприклад сезонні зміни) і залежить від місця спостереження.

Враховуючи сказане, для коефіцієнта Θ_j можна записати формулу

$$\Theta_j = k_{j\theta} \int_0^{L_j} \omega(l, t) \cos \psi(l, t) dl, \quad (4)$$

де $k_{j\theta}$ — коефіцієнт перерахунку загального вмісту вуглецю в атмосфері над j -м регіоном в усереднену за висотою його концентрацію, ψ — кут між сумарним вектором «рози вітрів» і нормаллю до границі регіону, dl — елементарна ділянка границі.

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Одним з центральних блоків моделі кругообігу вуглецю на регіональному рівні повинна бути система збору, сортування і накопичення результатів вимірювання і моделювання. Для цих цілей пропонується відповідна інформаційна база, яка буде забезпечувати модель необхідними параметрами, прив'язувати її до визначених просторово-часових умов і регулювати потік даних в моделі в залежності від зовнішніх умов.

З точки зору створення інструментарію спостереження і моделювання кінцева мета полягає в розробці такої системи, яка здатна забезпечити достатньо швидке отримання інформації (практично в режимі реального часу) про регіон в цілому і про його підсистеми, з використанням для цього як звичайних, так і аерокосмічних засобів спостереження, при незаперечній перевазі останніх. Зокрема за допомогою інформації з штучних супутників Землі можна ефективно визначати площі з однаковим рослинним покривом, забрудненість та хімічний склад атмосфери, рух повітряних мас, вологість ґрунту, температуру земної поверхні та ін. Методики отримання значень ряду основних параметрів описано в роботах [1–3, 6].

Для визначення вказаних параметрів можна використовувати одночасно як поточні дані дистанційного зондування, так і створені на даний час бази даних, як, наприклад, база даних рослинного покриву планети, розроблена спільно US Geological Survey, University of Nebraska-Lincoln та European Commission Joint Research Center або Global 30 Arc Second Elevation Data Set. Розроблено також інформаційні технології пошуку відповідних даних, які доступні в мережі «Інтернет». На жаль, вказані бази даних містять недостатній обсяг інформації щодо Карпатського регіону, тому доцільніше тут користуватися послугами українських центрів обробки аерокосмічної інформації.

Дистанційне зондування поверхні регіону надає можливість визначення, практично в режимі реального часу, багатьох параметрів моделі кругообігу вуглецю. Проте це зовсім не відкидає необхідності здійснення польових досліджень для визначення ряду параметрів протікання основних біохімічних процесів всередині конкретних екосистем.

Інша сторона проблеми, пов'язаної з використанням даних дистанційного зондування, полягає в неоднорідності рослинного покриву екосистем, типу ґрунту, кліматичних умов (температури, освітленості, кількості опадів і т. п.). Так, наприклад, для побудови точної моделі окремої екосистеми вона повинна складатись з однорідних зон за рослинним покривом і типом ґрунту, що далеко не відповідає дійсності. Тому усереднюємо ці параметри наступним чином:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i S_i / \sum_{i=1}^n S_i,$$

де p — деякий параметр моделі (біомаса рослинності, кількість гумусу, температура і т. п.); p_i — параметр, визначений для i -ї однорідної ділянки, S_i — площа i -ї ділянки, n — кількість таких ділянок в зоні.



Рис. 3. Структура спеціалізованої геоінформаційної системи

СПЕЦІАЛІЗОВАНА ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

Дані, необхідні для визначення параметрів математичної моделі та результати моделювання зручно представляти за допомогою спеціалізованої геоінформаційної системи. Такі системи широко використовуються у різних сферах життя, в тому числі для екологічного моніторингу, охорони довкілля тощо, і продемонстрували свої переваги.

Пропонуємо відповідну спеціалізовану геоінформаційну систему для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону, структура якої зображена на рис. 3. Вона включає математичну модель прогнозування антропогенних викидів CO_2 в атмосферу за декількома сценаріями, математичну модель кругообігу вуглецю та шість тематичних перетинів, кожен з яких пановнюють даними, отриманими в результаті дистанційного зондування та польових досліджень.

Тематичні перетини та їх інформаційне наповнення, яке включає сезонні залежності параметрів, має такий вигляд.

«Атмосфера» — хімічний склад, вміст забруднюючих елементів (те ж для сусідніх регіонів), рух повітряних мас («рози вітрів» на межі з сусідніми регіонами).

«Рослинний покрив» — для найбільш характерних типів рослин визначають площу, біомасу в ярусах, питомі інтенсивності фотосинтезу, опаду та характерні точки залежностей інтенсивності фотосинтезу та опадання, а також характерні точки залежностей від температури, вологості ґрунту, освітленості, концентрації CO_2 в атмосфері, чутливості до забруднень.

«Грунти» — типи ґрунтів, а також для кожного

типу маса і якість гумусу, підстилки, питомі інтенсивності розкладу підстилки і гумусу, характерні точки залежності інтенсивності розкладу від температури та вологості ґрунту, чутливість до забруднень.

«Кліматичні умови» — температура та вологість повітря, опади, освітленість.

«Господарська діяльність» — сільськогосподарські роботи (періодичність і планування), вирубування і посадка лісів (обсяги і планування), забруднення навколишнього середовища та викиди CO_2 в атмосферу (обсяги і планування), те ж для сусідніх регіонів, сценарії економічного розвитку.

«Результати моделювання» — концентрація CO_2 в атмосфері, біомаса рослин в ярусах, площа угрупувань (як функція біомаси), вуглецевий баланс.

Дані можуть оброблятися в різному часовому масштабі. В системі реалізовано також графічне представлення інформації.

МОЖЛИВОСТІ СИСТЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ

Пропонована інформаційна технологія та програмні засоби моделювання кругообігу вуглецю на регіональному рівні насамперед дають можливість оцінювати екологічну чистоту Карпатського регіону. При цьому використовуються такі вхідні дані:

- площі окремих підсистем (біогеоценозів), концентрація вуглецю в атмосфері, «рози вітрів» на границі регіону, оціночні дані про викиди вуглецю в атмосферу в результаті господарської діяльності;
- параметри залежностей, які визначають питому інтенсивність процесів біосинтезу зеленої фітомаси та її відмирання, відмирання деревини та коренів, розкладу органічної речовини та гумусу;
- параметри, які визначають функціональні залежності вказаних вище величин від температури, концентрації вуглекислого газу, вологості, освітленості та ін.

Запропоновані підходи до побудови математичної моделі кругообігу вуглецю для Карпатського регіону можна використати для формування аналогічних моделей для інших районів. Математичну модель кругообігу вуглецю для всієї планети тоді будуть на основі регіональних моделей і виразів зв'язку, які відображають взаємний вплив сусідніх регіонів. Кількість регіонів, на які розділяють поверхню Землі, в принципі не обмежена. Істотним фактором при розбитті на регіони є якісна і кількісна специфіка протікання біохімічних процесів.

Практична цінність такого підходу полягає в тому, що він дає можливість врахувати неоднорідність протікання біохімічних процесів в різних регіонах планети.

1. Географическая интерпретация аэрокосмической информации: (Сб. науч. тр.) / Под ред. Л. Н. Васильева. — М.: Наука, 1988. — 131 с.
2. Григорьев А. А. Антропогенные воздействия на природную среду по наблюдениям из космоса. — Л.: Наука, 1985. — 239 с.
3. Григорьев А. А. Роль космических наблюдений в экологических исследованиях: опыт и перспективы. — Л.: Наука, 1989. — 36 с.
4. Грицик В. В., Бунь Р. А., Дачук В. С. Діакоптичний підхід до моделювання біогеохімічного кругообігу вуглецю в біосфері // Доповіді НАН України. — 1997. № 4. — С. 77—81.
5. Крапивин В. Ф., Свирижев Ю. М., Тарко А. М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. — М.: Наука, 1982. — 272 с.
6. Мелуа А. И. Космические природоохранные исследования. — Л.: Наука, 1988. — 172 с.

7. Моисеев Н. Н., Александров В. В., Тарко А. М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. — М.: Наука, 1985. — 272 с.
8. Одум Ю. Экология. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с.
9. Keeling C. D., Bacastow R. B., Cartes A. F., Piper S. A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: Analysis of observational data // Aspects of climate variability in the Pacific and western Americans / Ed. D. H. Peterson. Geophys. — 1989. — P. 165—236.

SPECIALIZED GIS FOR ESTIMATING THE CARBON BUDGET OF THE CARPATHIAN REGION BASED ON THE EARTH REMOTE SENSING DATA

R. A. Bun', M. I. Husti, V. I. Lishchenyuk

A mathematical carbon cycle model for the Carpathian Region is built, with the relationship between neighbouring regions taken into account. Earth remote sensing data are used for the determination of some model parameters. It is noted that the carbon dioxide concentration in the atmosphere is the controlling factor in the greenhouse effect at present. The structure of a specialized geoinformation system for estimating the carbon budget of the Carpathian Region is described.

УДК 518.5+518.62

Представлення функцій у системах керування

Б. О. Попов

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Надійшла до редакції 16.03.98

Запропоновано підхід до обчислення математичних функцій у системах керування космічними апаратами, що дозволяє значно прискорити обчислення. Підхід базується на рівномірному наближенні функцій раціональними чебишовськими сплайнами. Для основних елементарних функцій одержані вирази для величин похибок та границь ланок.

ВСТУП

При розв'язанні багатьох технічних задач значна частина часу витрачається на обчислення математичних функцій. Так, швидкодія систем керування космічними апаратами суттєво залежить від того, наскільки ефективно проводиться обчислення елементарних функцій. Тому методи обчислення елементарних функцій досі привертають значну увагу дослідників [6, 8].

Один з методів прискорення обчислень — поділ усього проміжку наближень $[a, b]$ на r частин і використання на кожній з цих частин свого наближеного виразу

$$F(A_i, x) = F(a_0^{(i)}, a_1^{(i)}, \dots, a_m^{(i)}; x), \quad i = 1, \dots, r.$$

Позначимо через $Z = \{z_i\}_{i=0}^r$ ($a = z_0 < z_1 < \dots < z_r = b$) вузли сплайна $S_m(x)$:

$$S_m(x) = \sum_{i=1}^r F(A_i, x) \Theta((x - z_{i-1})(z_i - x)), \quad (1)$$

де

$$\Theta(u) = \begin{cases} 1 & \text{зна } u \geq 0, \\ 0 & \text{зна } u < 0. \end{cases}$$

Якщо максимальні похибки на підінтервалах $[z_{i-1}, z_i]$

$$\mu_i = \max_{x \in [z_{i-1}, z_i]} |(f(x) - F(A_i, x)) / w(x)|,$$

де $w(x) > 0$ — вага наближення, рівні між собою ($\mu_i = \mu$) то маємо рівномірне наближення сплайнами.

Рівномірне наближення сплайнами є оптимальним у тому сенсі, що при заданій кількості ланок одержуємо найменшу похибку. Знаходження точного значення рівномірного наближення сплайнами — складна обчислювальна проблема. Тому використовуються алгоритми визначення параметрів наближень, що є близькі до рівномірних [3].

За основу знаходження параметрів рівномірних наближень можна прийняти вираз для похибки рівномірного наближення сплайнами із r ланками, який для чебишовських сплайнів (сплайнів із ланками — найкращими чебишовськими наближеннями) при $r \rightarrow \infty$ має вигляд [2]

$$\mu = \frac{r^{-m+1}}{2^{m+1}(m+1)!} \left(\int_a^b |\eta(f, F) / w(x)|^{1/(m+1)} dx \right)^{m+1} \times \\ \times \left[1 + O\left(\frac{b-a}{r}\right) \right], \quad (2)$$

де $\eta(f, F) \equiv \eta(f(x), F)$ — ядро наближення, що залежить від наближуваної функції $f(x)$ та наближачого виразу $F(A, x)$.

Найскладніша задача при визначенні параметрів рівномірного наближення сплайном (1) — визначення границь ланок. Тому переходимо до асимптотично рівномірного наближення, для якого при $r \rightarrow \infty$ справедливо $\mu_i = \mu \left[1 + O\left(\frac{b-a}{r}\right) \right]$ для усіх $i = 1, \dots, r$. Границі ланок такого наближення задовольняють рівняння

$$\int_a^b |\eta(f, F)/w(x)|^{\frac{1}{m+1}} dx = r \int_a^{z_i} |\eta(f, F)/w(x)|^{\frac{1}{m+1}} dx, \quad (3)$$

$$i = 0, \dots, r.$$

Числові методи для визначення вузлів сплайну (1) з рівнянь (3) розглянуті у роботі [2]. Ясно, що усі вузли можна знаходити водночас при використанні розпаралелювання.

Якщо ланки сплайнів — раціональні многочлени

$$R_{k,l}(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^i / \left(1 + \sum_{i=1}^l b_i x^i \right), \quad k+l=m, \quad (4)$$

то ядро наближення виражається формулою [2]

$$\eta_{k,l}(f) = \eta(f, R_{k,l}) = (m+1)! \Delta_{k+l+1}(f) / \Delta_{k,l}(f), \quad (5)$$

де

$$\Delta_{k,l}(f) = \begin{cases} 1 & \text{при } l=0, \\ \begin{vmatrix} c_{k+l-1} & c_{k+l-2} & \dots & c_k \\ c_{k+l-2} & c_{k+l-3} & \dots & c_{k+l-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_k & c_{k+1} & \dots & c_{k+l+1} \end{vmatrix} & \text{при } l>0, \end{cases}$$

$$c_v = c_v(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } v < 0, \\ f^{(v)}(x)/v! & \text{при } v = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Для багатьох математичних функцій знаходження похибок та границь ланок можна спростити.

НАБЛИЖЕННЯ ПОКАЗНИКОВИХ ФУНКЦІЙ

Позначимо через $E_{k,l}(f, w; a, b)$ похибку рівномірного наближення функції за допомогою чебишовського раціонального сплайна із ланками виду (4) на проміжку $[a, b]$. Вага наближення — $w(x)$, кількість ланок — r .

Теорема 1. Ядро наближення функції $f(x) = c^{\alpha x}$ ($c > 1$, $\alpha \neq 0$) за допомогою раціонального многочлена (4) має вигляд

$$\eta_{k,l}(c^{\alpha x}) = \frac{(\alpha \ln c)^{m+1} k! l!}{m!} c^{\alpha x}. \quad (6)$$

Доведення одержуємо при підстановці функції $f(x) = c^{\alpha x}$ у вираз (5).

Наслідок 1. Максимальна похибка асимптотично рівномірного наближення чебишовським сплайном із r ланками функції $f(x) = c^{\alpha x}$ при $w(x) = 1$ виражається формулою

$$\varepsilon_{k,l}(c^{\alpha x}) = E_{k,l}(c^{\alpha x}, 1; a, b) = \frac{(m+1)^{m+1} k! l!}{2^{2m+1} m! (m+1)! r^{m+1}} \left| c^{\frac{ab}{m+1}} - c^{\frac{a\alpha}{m+1}} \right|^{m+1}. \quad (7)$$

Менш точні вирази для похибки (7) зустрічались у роботах [4, 7]. Ці вирази можна одержати із формули (7) при $r = 1$, $a = -1$, $b = 1$, $m \rightarrow \infty$.

Наслідок 2. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції $f(x) = c^{\alpha x}$ чебишовським сплайном із r ланками при $w(x) = 1$ визначаються за формулами

$$z_i = \frac{m+1}{\alpha \ln c} \ln \left| \frac{r-i}{i} c^{\frac{a\alpha}{m+1}} + \frac{i}{r} c^{\frac{ab}{m+1}} \right|, \quad i = 0, \dots, r. \quad (8)$$

Наслідок 3. Максимальна похибка асимптотично рівномірного відносного наближення чебишовським сплайном із r ланками функції $f(x) = c^{\alpha x}$ виражається формулою

$$\delta_{k,l}(c^{\alpha x}) = E_{k,l}(c^{\alpha x}, f(x); a, b) = \frac{k! l! (\alpha \ln c)^{m+1} (b-a)^{m+1}}{2^{2m+1} m! (m+1)! r^{m+1}}. \quad (9)$$

Частковий випадок формули (9) при $k = l$, $a = -1$, $b = 1$, $r = 1$ одержано в роботі [1].

Наслідок 4. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції $f(x) = c^{\alpha x}$ чебишовським сплайном із r ланками при $w(x) = f(x)$ визначається за формулами

$$z_i = a + i(b-a)/r, \quad i = 0, \dots, r. \quad (10)$$

Похибка асимптотично рівномірних наближень функції $f(x) = c^{\alpha x}$ при $x \in [0, 1]$ практично не відрізняється від похибки рівномірних наближень. При $w(x) = 1$, $c = 10$ вже при $r = 1$ помилка формули (7) не більша за 3 %, при $w(x) = f(x)$, $c = 10$, $r = 1$ помилка формули (9) не більша 10 %. Із збільшенням r помилки цих формул швидко зменшуються.

Формули (7) та (9) показують, що при $k+l = m = \text{const}$ найменша похибка наближення буде

при $k=l$ або $k=l+1$. Із формул (8) та (10) випливає, що розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення показникових функцій за допомогою раціональних сплайнів не залежить від степеня чисельника та знаменника виразу (4), а лише від їх суми $m=k+l$. Більш того — асимптотично рівномірне відносне наближення у даному випадку збігається з таким же наближенням із ланками рівної довжини.

НАБЛИЖЕННЯ СТЕПЕНЕВИХ ФУНКЦІЙ

Теорема 2. Ядро наближення функції $f(x) = x^a$ ($\alpha \neq 0, x > 0$) за допомогою раціонального многочлена (4) має вигляд

$$\eta_{k,l}(x^a) = \frac{k!l!}{m!} (\alpha - k)_{m+1} x^{a-m-1}, \quad (11)$$

де $(a)_m = a(a+1)\dots(a+m-1)$ — символ Похгаммера.

Доведення одержуємо при підстановці функції $f(x) = x^a$ у вираз (5).

Наслідок 1. Максимальна похибка асимптотично рівномірного наближення чебишовським сплайном із r ланками функції $f(x) = x^a$ при $w(x) = 1$ виражається формулою

$$\varepsilon_{k,l}(x^a) = E_{k,l}(x^a, 1; a, b) =$$

$$= \frac{k!l!(m+1)^{m+1} |(\alpha - k)_{m+1}|}{2^{2m+1} m! (m+1)! (\alpha)^{m+1}} \left| b^{\frac{\alpha}{m+1}} - a^{\frac{\alpha}{m+1}} \right|^{m+1}. \quad (12)$$

Можна показати, що відносна похибка формули (12) має вигляд

$$\delta_\mu(x^a, 1) = \frac{\theta(\alpha - m - 1)}{2r} \ln \frac{b}{a} + O\left(\left(\frac{b-a}{r}\right)^2\right), \quad |\theta| < 1.$$

При близькому до нуля a помилка формули (12) зростає необмежено і використовувати її не можна. При $\alpha = m+1$ з формули (12) маємо

$$\varepsilon_{m,0}(x^{m+1}) = E_{m,0}(x^{m+1}, 1; -1, 1) = 2^{-m}. \quad (13)$$

Вираз (13) є точним, що випливає із властивостей многочленів Чебишова [3].

Наслідок 2. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції $f(x) = x^a$ чебишовським сплайном із r ланками при $w(x) = 1$ визначаються за формулами

$$z_i = \left(\frac{r-i}{r} a^{\frac{\alpha}{m+1}} + \frac{i}{r} b^{\frac{\alpha}{m+1}} \right)^{\frac{m+1}{\alpha}}, \quad i = 0, \dots, r. \quad (14)$$

Наслідок 3. Максимальна похибка асимптотично рівномірного наближення чебишовським сплайном із r ланками функції $f(x) = x^a$ при $w(x) = f(x)$ описується формулою

$$\delta_{k,l}(x) = E_{k,l}(x^a, f(x); a, b) = \frac{k!l!(\ln b - \ln a)^{m+1} |(\alpha - k)_{m+1}|}{2^{2m+1} m! (m+1)! r^{m+1}}. \quad (15)$$

Можна показати, що відносна похибка формули (15) має вигляд

$$\delta_\mu(x^a, 1) = \frac{\theta(m+1)}{2r} \ln \frac{b}{a} + O\left(\left(\frac{b-a}{r}\right)^2\right), \quad |\theta| < 1. \quad (16)$$

Отже формулу (15) не можна використовувати при a , близькому до нуля. При обчисленні функції x^a на ЕОМ звичайно використовують найкраще чебишовське наближення цієї функції на проміжку $[a, 1]$. Похибка асимптотично рівномірного наближень функції $f(x) = x^a$ при $x \in [1/2, 1]$, $\alpha = 1/2$ та $w(x) = 1$ практично не відрізняється від похибки рівномірних наближень уже при $r = 1$. За тих же умов для $w(x) = f(x)$ різниця не більша 1 %.

Наслідок 4. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції $f(x) = x^a$ чебишовським сплайном із r ланками при $w(x) = f(x)$ визначається за формулами

$$z_i = a(b/a)^{i/r}, \quad i = 0, \dots, r. \quad (17)$$

Із формул (12) та (15) для похибок легко знайти найменшу похибку наближення при фіксованому числі параметрів раціонального многочлена (4) $k+l = m = \text{const}$. Так, для $\alpha \in (0, 1)$ найменша похибка досягається при $k=l$ або $k=l+1$. З формули (14) випливає, що розміщення вузлів асимптотично рівномірного абсолютного наближення степеневі функції раціональним сплайном залежить лише від суми $m=k+l$. Формула (17) показує, що розміщення вузлів асимптотично рівномірного відносного наближення степеневі функції раціональним сплайном те саме для будь-якого раціонального сплайна.

НАБЛИЖЕННЯ ЛОГАРИФМІЧНИХ ФУНКЦІЙ

Теорема 3. Ядро наближення функції $f(x) = \log_c x$ ($c > 1, x > 0$) за допомогою раціонального многочлена (4) має вигляд

$$\eta_{k,l}(\log_c x) = \frac{x^{-m-1} (k!l!)}{m! \ln c}, \quad k \geq l. \quad (18)$$

Доведення одержуємо при підстановці функції $f(x) = \log_e x$ у вираз (5).

При $k < l$ не вдається отримати такого простого виразу для ядра наближення. Для перевірки ядер $k > l$ виявилось, що $\eta_{k,l}(\log_e x) > \eta_{l,k}(\log_e x)$. Тому наближення логарифмічних функцій раціональними многочленами при $k < l$ практично не використовуються [3, 5].

Наслідок 1. Максимальна похибка асимптотично рівномірного наближення чебишовським сплайном із r ланками функції $f(x) = \log_e x$ при $w(x) = 1$ записується формулою

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k,l}(\log_e x) &= E_{k,l}(\log_e x, 1; a, b) = \\ &= \frac{(k!l!)^2 (\ln b - \ln a)^{m+1}}{r^{m+1} 2^{2m+1} m!(m+1)! \ln c}, \quad k \geq l. \end{aligned} \quad (19)$$

Відносна похибка формули (19) має вигляд (16). Тому формулу (19) не можна використовувати при a , близькому до нуля. При обчисленнях на ЕОМ звичайно використовують найкраще абсолютне раціональне наближення на проміжку $[a, 1]$ при $a > 0$. При $a = 1/2$ формулою (19) можна користуватися уже при $r = 1$. Найменше значення похибки за формулою (19) при $k+l = m = \text{const}$ досягається при $k=l$ або $k=l-1$.

Наслідок 2. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції $f(x) = \log_e x$ чебишовським сплайном із r ланками при $w(x) = 1$ знаходимо за формулами (17).

НАБЛИЖЕННЯ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

Усі тригонометричні та обернені їм функції є парними або непарними. При $|x| < R$ вони можуть бути представлені степеневими рядами

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i x^{ip+s}, \quad (20)$$

де p та s — цілі числа. Тому такі функції зручно наближати сплайнами (1) із ланками

$$V_m(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^{ip+s}. \quad (21)$$

Теорема 4. Ядро наближення функції $f(x)$ виду (20) за допомогою многочлена (21) при $|x| < R$ має вигляд

$$\eta(f, V_m) = x^{(p-1)(m+1)-s} p^{m+1} \sum_{i=0}^m \frac{(i+m+1)!}{i!} \alpha_{i+m+1} x^{ip}. \quad (22)$$

Доведення теореми наведено у роботі [2].

Наслідок 1. Максимальна похибка ε_m асимптотично рівномірного наближення функції (20) чебишовським сплайном із r ланками (21) при $w(x) = 1$, $x \in [0, b]$, $b < R$ визначається за формулою

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= \frac{\alpha_{m+1} b^{p(m+1)+s}}{2^{2m+1} r^{m+1}} \left[\frac{p(m+1)}{p(m+1)+s} \right]^{m+1} \times \\ &\times \left[1 + \frac{\alpha_{m+2}}{\alpha_{m+1}} \frac{m+2}{m+1} \frac{p(m+1)+s}{2p(m+1)+s} b^p + \xi_m b^{2p} \right]^{m+1}, \quad (23) \\ \lim_{m \rightarrow \infty} \xi_m &= 0. \end{aligned}$$

Наслідок 2. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції (20) чебишовським сплайном із r ланками виду (21) при $w(x) = 1$, $x \in [0, b]$ задовольняє квадратні відносно z_i рівняння

$$\begin{aligned} z_i^{2p} + 2Bz_i^p - b^p(b^p + 2B)(i/r)^{\frac{(m+1)p}{p(m+1)+s}} &= 0, \\ i &= 0, \dots, r, \end{aligned} \quad (24)$$

де

$$B = \frac{m+1}{2(m+2)} \frac{\alpha_{m+1}}{\alpha_{m+2}} \frac{2p(m+1)+s}{p(m+1)}.$$

Так, для $f(x) = \sin x$, $p = 2$, $s = 1$, $\alpha_i = (-1)^i / (2i+1)!$, тому із виразів (23) та (24) випливає

$$\begin{aligned} \varepsilon_m(\sin x) &\approx \frac{b^{2m+3} r^{-m-1}}{2^m (2m+3)!} \left(\frac{m+1}{2m+3} \right)^{m+1} \times \\ &\times \left[1 - \frac{(2m+3)b^2}{2(m+1)(2m+5)(4m+5)} \right]^{m+1}, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} z_i &= \sqrt{B - \sqrt{B^2 - b^2(2B - b^2)(i/r)^{(2m+2)/(2m+3)}}}, \\ B &= (2m+5)(4m+5)/2. \end{aligned}$$

Наведені формули достатньо точні при $b \leq \pi/2$.

Наслідок 3. Максимальна похибка δ_m асимптотично рівномірного наближення функції (20) чебишовським сплайном із r ланками (21) при $w(x) = f(x)$, $x \in [0, b]$, $b < R$ визначається за формулою

$$\delta_m = \frac{\alpha_{m+1} r^{-m-1}}{\alpha_0 2^{2m+1}} \left\{ b^m + \frac{1}{2(m+1)} \times \right. \\ \times \left[\frac{\alpha_{m+2}}{\alpha_{m+1}} (m+2) - \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right] b^{2m} + \xi_m b^{3m} \left. \right\}^{m+1}, \quad (25) \\ \lim_{m \rightarrow \infty} \xi_m = 0.$$

Наслідок 4. Розміщення вузлів асимптотично рівномірного наближення функції (20) чебишовським сплайном із r ланками виду (21) при $w(x) = f(x)$, $x \in [0, b]$ задовольняє квадратні відносно z_i рівняння

$$z_i^{2r} + 2Bz_i^r - b^r(b^r + 2B)i/r = 0, \quad i = 0, \dots, r, \quad (26)$$

де

$$B = \alpha_0 \alpha_{m+1} (m+1) / [\alpha_0 \alpha_{m+2} (m+2) - \alpha_1 \alpha_{m+1}].$$

Так, для $f(x) = \cos x$, $p = 2$, $\alpha_i = (-1)^i / 2i!$. Тому із виразу (25) та рівнянь (26) випливає, що $B = 2m + 3$,

$$\delta_m(\cos x) = \frac{r^{-m-1}}{2^{2m+1}(2m+2)!} [b^2 + b^4/2(2m+3)]^{m+1},$$

$$z_i = \sqrt{\sqrt{b^2 + ib^2(b^2 + 2B)/r} - B}, \quad i = 0, \dots, r$$

Наведені формули достатньо точні при $b \leq \pi/2$. Виходячи із виразів (23) та (24), можна написати формули для похибок і рівняння для вузлів сплайнів для багатьох тригонометричних, гіперболічних, обернених ім функцій, а також для функції Бесселя.

ВИСНОВКИ

Викладене дає можливість будувати ефективні процедури із використанням розпаралелювання обчислень для одержання числових значень елементарних та спеціальних функцій. Такі процедури зручно використовувати у системах керування космічними апаратами, що дозволяє збільшити точність та прискорити прийняття рішень при керуванні.

1. Немецх Г. Об одном относительно рациональном приближении функции e^x // Мат. заметки. — 1977. — 21, № 4. — С. 581 — 586.
2. Попов Б. А. Равномерное приближение сплайнами. — Киев: Наук. думка, 1989. — 272 с.
3. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ. Справочник. — Киев: Наук. думка, 1984. — 600 с.
4. Braess D. On the conjecture of Meinardus on rational approximation to e^x // J. Approxim. Theory. — 1984. — 40, N 4. — P. 375 — 379.
5. Computer approximation / Eds J. F. Hart, E. V. Cheney et al. — New York: Wiley, 1968. — 334 p.
6. Kalantari B., Kalantari J. High order iterative methods for approximation square roots // BIT. — 1996. — 36, N 2. — P. 395 — 396.
7. Meinardus G. Approximation of functions. Theory and numerical methods. — Berlin: Springer, 1967. — 198 p.
8. Schulte M. J., Omar J., Swartzlander E. E. Optimal initial approximations for the Newton-Raphson division algorithm // Computing. — 1994. — 53, N 3-4. — P. 233 — 242.

REPRESENTATION OF FUNCTIONS IN CONTROL SYSTEMS

B. O. Popov

We propose a hardly efficient approach for calculating mathematical functions in space control systems. The approach is based on a balanced approximation of the functions by rational Chebyshev splines. Expressions are obtained for the errors and link borders for the main mathematical functions.

УДК 681.513

Моделювання динаміки оперативності космонавта в умовах тривалого перебування в пілотованих системах

Р. М. Камінський

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

Надійшла до редакції 13.04.98

Представлений математичний підхід і моделі для ідентифікації робочого стану та якості діяльності космонавта-оператора в людино-машинному інтерфейсі систем управління складними технологічними процесами. Запропоновано модель динаміки оперативності тривалостей процесів вибору, прийняття і реалізації рішень у формі часового ряду та модель на основі марковських процесів для визначення ймовірності перебування оператора в конкретному стані працездатності. Моделі зорієнтовані на слідкуючі системи ідентифікації діяльності оператора безпосередньо на його робочому місці.

ВСТУП

За останній час у високовідповідальних складних системах прослідковується тенденція зростання рівня автоматизації і комп'ютеризації людино-машинних інтерфейсів підсистем керування складними технологічними процесами. Висока надійність, резервованість та якість технічного оснащення таких інтерфейсів перекладає на людину-оператора фактично всю відповідальність за порушення режимів роботи довіреної йому системи. Це значною мірою зумовлено тим, що сприйняття та аналіз вхідної інформації, процеси вибору, прийняття та реалізації рішень та їх оперативність, загальна результативність роботи визначаються його робочим станом. У зв'язку з цим питання ідентифікації біжучого робочого стану оператора відносно його норми є актуальним і надзвичайно важливим. Одним з можливих способів розв'язку цієї проблеми є розробка індивідуальних математичних моделей динаміки показників якості операторської діяльності. Такі моделі є базовими для систем виявлення відхилень показників якості роботи оператора

безпосередньо в його робочому середовищі. Індивідуальні моделі узагальнюють типові для нього робочі характеристики та динаміку їх показників протягом роботи та під впливом різних факторів. Їх також використовують як опорні при ідентифікації біжучого робочого стану оператора. Найбільш адекватними є моделі динаміки показників операторської діяльності та моделі на основі марковських процесів, які дозволяють враховувати різні стани системи. В роботі [12] розглядається поведінка людино-машинної системи на моделі марковського процесу з двома станами. Марковська модель з трьома станами для оцінки надійності оператора представлена в роботі [15]. Однак ці моделі розглядають лише нормальні та критичні стани оператора і не враховують проміжних станів. Це виключає можливість своєчасної підтримки оператора при погіршенні показників його роботи.

Метою даної роботи є відображення ролі часових витрат при аналізі ситуацій, виборі, прийнятті, та реалізації рішень людиною-оператором в узагальнених моделях його діяльності, представлення діяльності цього показника в умовно розділених

просторах працездатності і функціонального стану оператора та створення математичних моделей тенденції його оперативності для систем ідентифікації біжучого робочого стану оператора з індивідуальними моделями для його норми.

**1. ФОРМАЛІЗАЦІЯ ДІЯЛЬНОСТІ КОСМОНАВТА
В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ
СКЛАДНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ**

Розглянемо деякий замкнутий ізольований фізичний простір, який переміщується в космосі. Таким простором може бути космічний орбітальний комплекс, пілотована космічна станція тощо. Загальною особливістю таких об'єктів є те, що вони гранично наповнені апаратурними засобами життєзабезпечення, навігації, наукових досліджень і зв'язку. Програма дій персоналу є строго визначеною, робоче середовище максимально обмежене, а інтенсивність інформаційних потоків може перевищувати їх нормальне та допустиме сприйняття оператором.

Представимо операторську діяльність на прикладі керування космонавтом-оператором протягом часу $[0, T]$, деяким гіпотетичним технологічним процесом $Z(t)$, наприклад виконанням однієї з програм польоту. Такий процес включає і узагальнює найтиповіші аспекти і компоненти реальної операторської діяльності в людино-машинному інтерфейсі систем управління складними технологічними процесами для різних предметних областей, включаючи і роботу на пілотованій космічній станції. Протягом функціонування станції в регулярні або випадкові моменти часу t_i (відповідні до ситуацій) $t_i \in T$, де $T = \{t_i: t_i \in [0, T], i = 1, 2, \dots, N\}$, контролюючими пристроями фіксується характеристичний вектор показників режимних параметрів даної технології. Усі зміни значень цих показників і моменти часу цих змін реєструє головний чи спеціальний бортовий комп'ютер, який також фіксує моменти часу реалізації команд космонавта-оператора. Інформація про стан керованої технології та точуюче середовище представлена операторові на олі уваги пульту керування.

Нехай G^* — множина нормативних та інструктивних значень параметрів, які визначають оптимальну роботу керованої технології $Z(t)$, а G — множина реальних значень цих параметрів, які визначають біжучий стан цієї технології. В довільні моменти часу t_i оператор отримує інформацію про процес $Z(t_i)$. В результаті порушення режиму технології, границь параметрів робочого середовища, шливу різного роду завад Π в каналах передачі і

перетворення інформації, ця інформація відображає дійсний стан технології вектором $g_i = g(t_i)$ у формі зображення $x_i \in X$, де $X = \{x_i: x_i = x(t_i), t_i \in T, i = 1, 2, \dots, N\}$, на інформаційному полі пульту керування. Ці зображення сформовані на основі вектора значень $g_i = (g_1, \dots, g_n)$, $g_i \in G$ і визначають біжучий стан $Z(t_i)$ в момент t_i , де $r = 1, 2, \dots$ — кількість параметрів, в загальному різна для різних моментів часу. Вони представлені на полі уваги і використовуються оператором для розпізнавання та прийняття відповідних рішень. Вектори параметрів g_i^* , які відповідають інструкціям і нормативам G^* , для нормальних режимів роботи технології попередньо сформовані в пам'яті оператора у формі зображень $x_i^* \in X^*$.

На основі результатів аналізу зображень x_i і x_i^* оператор ідентифікує біжучу ситуацію, вибирає або конструює та приймає відповідне рішення $y_j \in Y$, де $Y = \{y_j: y_j = y(t_j), j = 1, 2, \dots, N, t_j = t_i + t_i, t_j, t_i \in [0, T]\}$, а t_i — час вибору, прийняття і реалізації рішення. Прийняте рішення у формі набору команд u_h , які утворюють вектор керування $u_j = (u_1, \dots, u_h)$, $u_j \in U$, де U — множина команд керування, $h = 1, 2, \dots$ — кількість команд в j -й ситуації, виконуються безпосередньо дією оператора на органи керування.

Постійне нервово і розумове напруження, почуття відповідальності та обов'язку, довготривала робота створюють суттєве психофізичне навантаження на оператора. При цьому сповільнюються когнітивні та моторні функції, погіршується зоровий пошук, знижується оперативність та безпомилковість дій, виникає значне нервово-психічне перенапруження. Незважаючи на великі резерви та адаптаційні можливості людини, такий стан негативно відбивається на якості її роботи. Тому при аналізі діяльності оператора ефективність його роботи характеризують конкретними робочими станами c_k . Множина $C = \{c_k: c_k = c(\delta t_k), \delta t_k = t_{k+1} - t_k; t_k, t_{k+1} \in [0, T]\}$ цих станів на практиці розглядається як дискретна, хоча чітку межу між c_k і c_j встановити неможливо.

На основі визначених базових складових операторської діяльності сформулюємо задачу оператора і фактично загальну модель його діяльності в системі управління технологією $Z(t)$ наступним чином:

— розпізнати для даного моменту часу t_i на зображенні $x_i \in X$ відхилення біжучих параметрів g_i від режимно заданих їх значень g_i^* і компенсувати ці відхилення вибором відповідного вектора команд u_h , реалізація якого поверне для технології $Z(t)$ заданий режим роботи. Вибір, прийняття і реалізація рішення повинні мати максимальну дос-

товірність $p \rightarrow 1$ при мінімальних витратах часу $t \rightarrow 0$, тобто

$$X(\mathbf{g}_i - \mathbf{g}_i^*) \xrightarrow[p \rightarrow 1]{t \rightarrow 0} \text{opt} U(x_i, c_i, y_i). \quad (1)$$

Форма (1) відображає головні аспекти діяльності людини оператора в людино-машинному інтерфейсі щодо оптимізації режимів процесу $Z(t)$ і враховує його індивідуальні робочі стани.

Використовуючи сучасне бачення процесів сприйняття візуальної інформації людиною, модель (1) розгорнемо таким чином.

Інформація про біжучий стан технології $Z(t)$, перетворена в зображення $x_i \in X$, подається операторові на інформаційному полі уваги. Це зображення є моделлю вхідної інформації $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$ на «вході» оператора. Оператор, використовуючи індивідуальні алгоритми розпізнавання, в залежності від ситуації, робочого стану та професійної майстерності крок за кроком будує концептуальну модель даної ситуації $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, звертаючись до збереженої в його пам'яті еталонної моделі $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$. В процесі розпізнавання ефективність взаємодій інформаційної $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$ та еталонної $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ моделей, їх інформаційна повнота, чіткість та строга відповідність даних ситуації визначають ефективність створення концептуальної моделі $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$. Цей процес залежить не лише від якості зображення x та стану середовища, але і від робочого стану оператора, який повною мірою визначає характер і оперативність когнітивних та моторних складових роботи зорового аналізатора, пам'яті, мозку. Аналізуючи біжучу ситуацію в процесі побудови для неї концептуальної моделі $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, оператор в своїй уяві персважно звертається до різних аналогів та множини Y варіантів рішень y_j , що зберігаються в його пам'яті, для вибору або створення відповідного рішення та вектора керуючих команд u_i , відповідного даним концептуальній моделі. Крім того, оператор може в уяві програвати та аналізувати можливі наслідки від прийняття вибраного того чи іншого рішення.

Процеси аналізу, вибору та реалізації рішень при високій кваліфікації оператора в якісному аспекті можна вважати безпомилковими, високоефективними або оптимальними, проте в кількісному аспекті вони вимагають відповідних затрат часу, які в кожній ситуації є індивідуальними показниками і визначають швидкість даного оператора. В цьому випадку такі процеси можна представити на базі моделі [13], яка враховує вплив перешкоджаючих факторів, заданих множиною Π , в трактах перетворення інформації та представлення зображень x_i у формі системи відображень

$$\alpha: Z(t) \times G^* \times \Pi \times T \rightarrow G,$$

$$\omega: G \times \Pi \times T \rightarrow X,$$

$$\mu: X \times \Pi^* \times T \rightarrow M(X(\mathbf{g}_i, t_i)), \quad \Pi^* \in \Pi$$

$$\kappa: M(X(\mathbf{g}_i, t_i)) \times E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)) \times T \times C(\delta t) \rightarrow K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)), \quad (2)$$

$$v: K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i)) \times Y \times C(\delta t) \times T \rightarrow U,$$

$$\rho: U \times T \times \Pi \rightarrow G \cup G^*.$$

Таким чином, множини моментів часу і станів $\{T\}$, $\{C\}$, пари множин $\{X, X^*\}$, $\{G, G^*\}$, $\{Y, U\}$, моделі $M(X(\mathbf{g}_i, t_i))$, $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ і $K(X(\mathbf{g}_i, t_i) \cap X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$, а також відображення α – апаратних перетворень; ω – візуалізації параметрів G ; μ – сприйняття інформації оператором; κ – створення концептуальної моделі; v – вибору вектора команд U та ρ – реалізації прийнятого рішення – характеризують загальну структуру роботи людино-машинного інтерфейсу системи управління технологією $Z(t)$.

В представленні (2) відображення κ і v включають множину C робочих станів оператора, тобто їх реалізація є виключно прерогативою оператора. Вони визначають ефективність його роботи і при високій надійності і працездатності технічних засобів практично повністю визначають ефективність людино-машинного інтерфейсу системи керування. Тому для високовідповідальних систем врахування людського фактора є дуже актуальним і свідчить про необхідність індивідуального підходу до організації, оптимізації і контролювання якості операторської діяльності.

2. ПОНЯТТЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ, ПРАЦЕЗДАТНОСТІ, ОПЕРАТИВНОСТІ ТА ЗВ'ЯЗОК МІЖ НИМИ

Всі вимоги і обмеження, які накладаються на операторську діяльність і практично визначають її ефективність, можуть бути зведені до двох категорій: достовірності (точності) і своєчасності (оперативності) [7], що саме і враховує модель (1).

Точність операторської діяльності визначається тією повнотою знань і досвіду оператора, які організовані в його пам'яті у формі еталонної моделі $E(X^*(\mathbf{g}_i^*, t_i))$ і яка дає конкретні представлення про нормативні показники роботи системи, що повинні бути досягнуті при виконанні окремих дій, а також про ті зміни, які необхідно виконати в системі для отримання потрібного результату. На ос-

Таблиця 1. Типові означення функціональних станів людини-оператора

Фази	Функціональний стан
—	Мобілізація; умовнорефлекторним шляхом підвищується тонус центральної нервової системи і підсилена функціональна активація багатьох психофізіологічних органів і систем; оператор у відмінній формі, внутрішньо зібраний, зосереджений на найкраще виконання роботи, чітко усвідомлює задачу і має сформовану концепцію дій.
I	Первинна реакція; короточасне зниження багатьох показників психофізіологічних процесів, зумовлене гальмуванням, пов'язаним зі зміною зовнішніх подразників; оператор входить в систему, старається відчуті її реакцію на свої дії, «зливається» з системою, утворюючи єдиний з нею організм.
II	Гіперкомпенсація; оптимізація фізіологічних механізмів, поступове підвищення тону центральної нервової системи, вироблення чітких динамічних стереотипів; оператор «втягується» в роботу, звикає до особливостей системи, поставлених задач, оптимізує алгоритм своєї діяльності, показники роботи покращуються.
III	Компенсація; встановлення оптимального режиму органів і систем організму, стабілізація показників; нормальна якість роботи, відсутні помилки, затрати часу на операції мінімальні, тривала і високоефективна праця.
IV	Субкомпенсація; зниження високого рівня, підтримка необхідного рівня основних функцій за рахунок послаблення менш важливих; розвивається втома, показники якості роботи знижуються, зростають часові витрати. Відчувається деяке напруження.
V	Декомпенсація; неухильне погіршення психофізіологічних функцій організму, виразні вегетативні порушення; відчувається втома, порушується точність рухів, зростає кількість помилок, робота вимагає щораз більших зусиль на мобілізацію, ефективність праці стрімко падає.
—	Зрив; розлад регулюючих механізмів, неадекватність фізіологічних реакцій на подразники зовнішнього середовища; різкий спад організованості, неможливість продовжувати роботу, значні витрати часу та велика кількість помилок, робота неприпустима.

пові сталонної моделі оператор організовує свою діяльність і підтримує її точність протягом всієї роботи.

Час в трудовій діяльності виступає головним критерієм продуктивності та ефективності. Він є кількісним показником інтеграційних процесів різних функцій організму, мобілізованих на досягнення поставленої мети. Своєчасність прийняття рішення, швидкість реалізації команд, часові витрати при виконанні тих чи інших дій є визначальними характеристиками операторської діяльності. Часові характеристики один з основних складових показників протікання когнітивних процесів, робочого стану оператора, його навантаженості, втоми, напруженості, уважності. Головною особливістю часових витрат є те, що вони, з однієї сторони, характеризують оператора в сенсі його психофізіології, тобто відображаються динамікою функціональних станів його організму, а з другої, — в сенсі динаміки оперативності, що відображає зміну рівня працездатності.

При дослідженнях людино-машинних інтерфейсів поняття функціонального стану та працездатності стосовно людини-оператора дуже взаємопов'язані. Кожній дії оператора відповідає свій комплекс психофізіологічних процесів та певні співвідношення між їх складовими. Перевищення хоча б однією складовою допустимих границь приведе до зниження якості виконання оператором його функцій або до невиконання поставленої перед ним за-

дачі. За результатами діяльності оператора можна визначити рівень його працездатності, проте визначити його функціональний стан практично неможливо. Виникає проблема взаємозв'язку, з однієї сторони, функціональних станів, а з іншої — працездатності та якості роботи.

Найчастіше функціональний стан визначають як фонову активність центральної нервової системи, при якій на даний момент виконується та чи інша робота [2]. З огляду на це під функціональним станом оператора розумітимемо інтегральний прояв своєрідної організації інтенсивностей всього комплексу психічних і фізіологічних процесів, які на даний момент часу визначають загальний рівень функцій організму в даному робочому середовищі при визначеній меті та завданнях. В цьому розгляді прийнято, що функціональний стан оператора зумовлений станом центральної нервової системи та станами різних фізіологічних систем. Означення фаз функціональних станів в психофізіологічній практиці переважно відповідає наведеним в табл. 1.

Розглянемо поняття працездатності. В літературних джерелах поняття працездатності переважно пов'язують з трудовою діяльністю та функціональними станами [3, 4, 8]; відображенням істинної працездатності, як вважають автори роботи [9], є такий рівень ефективності праці, при якому її максимальний прояв не шкодить здоров'ю; автори роботи [11] трактують працездатність як прогностич-

Таблиця 2. Прийняті означення рівнів працездатності

Рівні	Критерії – знання, досвід, узгодженість
1	Глибокі теоретичні і практичні знання в межах галузевої предметної області, великий досвід роботи на різних технологічних системах даного та аналогічних профілів, інтенсивність основних та допоміжних інформаційних потоків значно нижчі від можливостей сприйняття, ергодізайн відповідає естетичним уподобанням, почуттям зручності і комфорту, оперативне забезпечення різноманітною додатковою і спеціальною інформацією.
2	Повні знання методології і технології в даній предметній області; значний досвід роботи на конкретній та деяких аналогічних технологічних системах; добра узгодженість – інтенсивність основних та допоміжних інформаційних потоків дещо нижчі від можливостей сприйняття, ергодізайн відповідає естетичним уявленням, є відчуття зручності, робочого комфорту, забезпеченість необхідною додатковою і спеціальною інформацією.
3	Достатні знання методів і особливостей даної технології; є практичний досвід роботи на конкретній технологічній системі та різних технологічних процесах; нормальна узгодженість – інтенсивність основних і допоміжних інформаційних потоків та їх аналіз в межах можливостей сприйняття, ергодізайн забезпечує почуття зручності, забезпеченість додатковою і спеціальною інформацією.
4	Необхідні знання, лише для підтримки режимів даної технології; невеликий досвід стосовно конкретного технологічного процесу; слабка узгодженість – основні та допоміжні інформаційні потоки відповідають можливостям сприйняття, проте нестандартні ситуації вимагають мобілізації уваги і спричиняють напруженість, ергодізайн забезпечує певною мірою зручність, але неповним є забезпечення додатковою і спеціальною інформацією.
5	Поверхові знання, лише для підтримки режимів конкретного технологічного процесу; незначний досвід в межах технічного забезпечення та основних методик роботи даного технологічного процесу; низька узгодженість – пред'являються лише найбільш важливі інформаційні потоки даного технологічного процесу, деякі елементи ергодізайну створюють незначний дискомфорт, неоперативне забезпечення додатковою інформацією.
6	Слабкі знання, лише основних характеристик технологічного процесу та призначення елементів пульта керування; малий досвід роботи з пультом керування та практика на тренажерах; дуже низька узгодженість – пред'являються лише найважливіші показники технології, ергодізайн незначний, відсутність забезпечення додатковою інформацією.

цу категорію, що оцінює трудові можливості людини в часі; в статті [10] на підставі експериментальних даних розглядають шість рівнів працездатності: висока, підвищена, середня, знижена, низька та дуже низька.

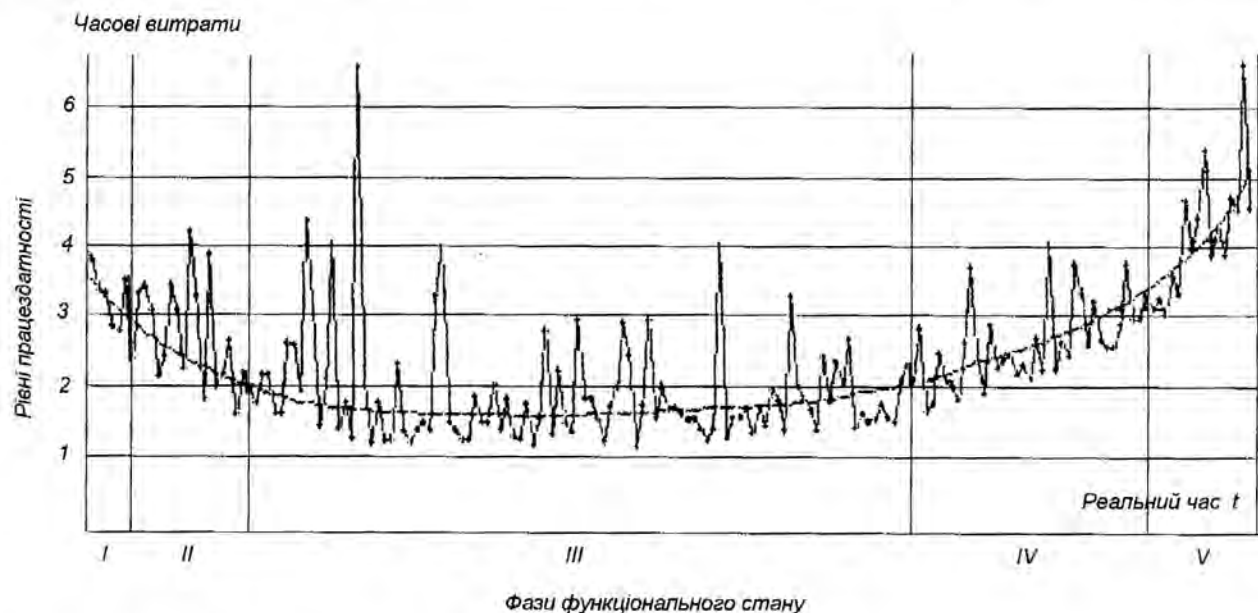
Не вступавши в полеміку, зауважимо, що логічно стосовно людини-оператора слід визначати категорію працездатності як функцію $P = P(Q, E, F, A)$, де Q – професійні знання, E – досвідченість, F – функціональний стан організму, A – рівень узгодження з індивідуальними можливостями оператора інформаційних потоків та ергодізайну виконавчих пристроїв. Складові Q, E, A є відносними, набутими в процесі навчання і роботи, а F визначає природний стан організму. Рівні працездатності важко розділити на окремі класи, оскільки складові працездатності є незалежними категоріями. Наприклад, добре підготовлений оператор в поганому організованому робочому середовищі може працювати гірше, ніж його слабше підготовлений колега в середовищі з високим рівнем організації і ергодізайну. Тому визначення рівнів працездатності певною мірою є ідеалізованим, а відповідність робочих показників конкретного оператора показникам властивим даному рівню є лише прикрий або прийнятний факт, який вимагає свого аналізу. Іншими словами, існує відповідність реального результату діяльності деякому з ідеалізованих ре-

зультатів гіпотетичної діяльності, для яких визначені рівні працездатності.

Сформулюємо шкалу працездатності оператора за такими критеріями: знання, досвід та ергономічна узгодженість. Останнє поняття означає ступінь ергономічної узгодженості можливостей оператора при сприйнятті інформації та реалізації прийнятих рішень в даному робочому середовищі. Ця шкала відображена в табл. 2.

В сенсі наведених міркувань працездатність розглядається як потенційні можливості оператора виконувати ним ефективно, якісно і оперативну конкретну операцію або їх сукупність в даному робочому середовищі, спрямовану на досягнення поставленої мети або розв'язку конкретної задачі.

Індивідуальні комплекси поведінкових реакцій, характер взаємодії і протікання фізіологічних і психічних процесів та рівень узгодженості інформаційно-технічного забезпечення визначають функціональний стан, забезпечують енергетичні, моторні (пластичні) і регуляторні умови виконання оператором цілеспрямованої діяльності в певному діапазоні параметрів робочого середовища. Хоча визначення функціонального стану оператора є досить нечітким як в якісному, так і в метрологічному розумінні і надзвичайно тісно пов'язане з працездатністю, спробуємо їх відокремити таким чином. Умовно розділимо характеристики цих кате-



Динаміка часових витрат. Випадкові значення — реальні дані часових витрат

горій, надавши їм наступну інтерпретацію: фази функціонального стану оператора визначають психофізіологічні функції систем організму впродовж часу роботи, а рівні працездатності його потенційні функціональні можливості.

На фоні цих двох суттєвих складових і характеристик ефективності операторської діяльності показник, обернений до часових витрат, визначає оперативність дій в кількісному плані і відображає взаємозв'язок між ними. Форма цього взаємозв'язку пояснена графіком на рисунку. Фазам функціонального стану відповідають інтервали на осі абсцис, рівням працездатності відповідають інтервали ординат. Часові витрати представлені значеннями випадкових величин та неперервним трендом, який моделює їх узагальнену тенденцію. В реальних ситуаціях деяких станів, особливо крайніх, може і не бути.

Специфічну U-подібну форму тренду в дослідженнях розбивають на 3–5 фрагментів, кожний з яких має власну і переважно загальноприйнятну інтерпретацію, яка певною мірою пов'язується з фазами функціонального стану оператора. Іншими словами і більш загально ці інтервали можна охарактеризувати наступним чином: I — перехідний період, II — адаптаційний період, III — період підтримання норми, IV — період прогресуючої втоми і V — період різкого погіршення показників різних видів діяльності. Принцип виділення цих інтервалів зображено на рисунку.

Людино-машинний інтерфейс є цілісною відповідно зорієнтованою системою, тому діяльність людини повинна оцінюватись відносно досягнення поставленої мети, в допустимих рамках зміни її працездатності. В сучасних автоматизованих системах задачі переважно є добре структуровані, діяльність оператора здійснюється в умовах досить жорстких часових та інформаційних обмежень і визначена добре відлагодженими алгоритмами, а її ефективність визначається переважно часовими витратами на вибір, прийняття і реалізацію рішень.

Тому врахування часових показників має важливе і вирішальне значення при організації та оптимізації робочих місць та проектування алгоритмів операторської діяльності.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОПЕРАТОРА

При моделюванні динаміки операторської діяльності основними даними є витрати часу на виконання окремих елементарних операцій чи на функціонально завершені групи операцій.

Розглянемо роботу оператора в інтервалі часу $[t_j, t_{j+m}]$, де $t_j, t_{j+m} \in [0, T]$. Нехай кожен раз фіксується значення часу, затраченого на конкретний вид операцій, тобто тривалість часу t_j з моменту виникнення ситуації, яка вимагає відповідної операції, до моменту її завершення оператором у

формі реалізації команди на пульті. Очевидно, в кожний момент часу t_i значення часових витрат t_i характеризують оперативність даного оператора. Структурною особливістю цих даних є прив'язка кожного їх значення до конкретного моменту часу: $y(t) = y(t_i)$, $i = 1, \dots, N$. Їх тренд, як правило, має U -подібну форму, а самі дані є випадковими величинами з 0-з одномодальним, асиметричним і зрізаним зліва законом розподілу. Послідовність в часі таких даних можна представити часовим рядом [14]

$$y(t) = m(t) + h(t) + \varepsilon_t, \quad (3)$$

де $m(t)$ — тренд даних, який характеризує загальну тенденцію динаміки, $h(t)$ — складова, яка враховує сукупність коливальних компонентів даних відносно тренду, а ε_t — випадкові некорельовані величини з $E[\varepsilon_t] = 0$ і $D[\varepsilon_t] = \sigma^2$.

Фактично тренд $m(t) = f(t_i, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n)$ є гладкою неперервною функцією, вид якої відповідає тенденції показника. В цьому плані задача елімінації тренду вважається однією з основних задач аналізу часових рядів і є головною при моделюванні динаміки працездатності оператора, а в даній роботі його оперативності.

Одним з варіантів розв'язку цієї задачі є апроксимація тренду, для чого широко використовують степеневі поліноми. При цьому необхідно врахувати такі зауваження.

1. Реальні ряди, в залежності від моментів початку і кінця збору даних, можуть описувати лише повну U -подібну залежність або її фрагменти, тому слід знайти певний компроміс між степенем полінома та його гнучкістю, оскільки при високому степені полінома екстремуми відображатимуть коливальність і тренд братиме на себе функції коливальної складової $h(t)$.

2. При знаходженні оцінок параметрів полінома можуть виникати різні труднощі в обчисленнях, що може вплинути на точність розрахунків.

3. Коефіцієнти при аргументах непридатні для фізичної інтерпретації і їх складно використати для оцінки чи взаємовідповідності щодо інтервалів фаз функціональних станів.

Якісний аналіз, переважно візуальний, допускає представлення U -подібності тренду зліва гіперболою або експонентою, всередині константою або лінією, а справа — параболою чи деякою показниковою функцією. Тобто модель тренду може бути реалізована в класі сплайнових моделей. Однак вибір сплайнових функцій, критеріїв оптимальності та точок спряження вимагає додаткових попередніх досліджень.

Тому при моделюванні тренду слід з обережніс-

тю підходити до вибору класу моделей та вибору їх варіантів.

Постановку задачі при моделюванні тренду часових витрат можна сформулювати як пошук класу моделей, які задовольняють наступні вимоги:

- сімейство моделей просте щодо розрахунку параметрів;
- моделі відповідають характеру фрагментів тренду, а їх параметри допускають фізичну інтерпретацію;
- клас моделей задовольняє принцип вибору і самоорганізації.

Формалізація експериментальних даних на основі принципу самоорганізації використовується для визначення адекватної моделі у відповідності з прийнятими критеріями.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТРЕНДУ ПОЛІНОМАМИ З МІШАНИМИ СТЕПЕНЯМИ

Для розв'язку даної задачі пропонується клас поліномних моделей з мішаними степенями, тобто степінь даного полінома належить множині цілих чисел: $i \in Z$. Ці поліноми мають вид

$$f(t) = \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=1n+1} \Theta_j t^i, \quad (4)$$

де n є порядок полінома.

Тоді для полінома (4) другого степеня матимемо рівняння в такій формі:

$$m(t) = \Theta_1 t^{-2} + \Theta_2 t^{-1} + \Theta_3 + \Theta_4 t + \Theta_5 t^2. \quad (5)$$

В цьому представленні кожний з коефіцієнтів умовно «відповідає» за конкретний фрагмент зліва направо узагальненого тренду U -подібної залежності. Таку відповідність параметрів Θ_j можна інтерпретувати як характеристику чи оцінку для кожного з виділених на осі абсцис інтервалів на рисунку. Проте ця відповідність не є безпосередньою і її можна прийняти лише після нормування даних для ідентифікації даних аналогічних моделей трендів, що відповідають одному і тому ж виду діяльності.

В переважній більшості моделюють дані, для яких тривалість збору відповідає кільком послідовним інтервалам. Тобто, отриманий в експериментах часовий ряд (3) не охоплює всю U -подібну залежність, а відповідає лише певному її фрагменту. Слід мати на увазі той факт, що навіть у випадку, коли функція тренду є постійною величиною і визначається лише параметром $\Theta_3 = \text{const}$, який має зміст середнього арифметичного, параметри Θ_1 , Θ_2 , Θ_4 і Θ_5 не будуть рівні нулю, оскільки вони зв'язані через значення часу для кожного моменту

Таблиця 3. Можливі варіанти моделей-претендентів

Номер моделі	Фрагменти інтервалів та відповідні їм параметри				
	I	II	III	IV	V
	t^{-2}	t^{-1}	t^0	t^1	t^2
1	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5
2	Θ_1	Θ_2	Θ_4	Θ_4	—
3	Θ_1	Θ_2	Θ_3	—	Θ_5
4	Θ_1	Θ_2	—	Θ_4	Θ_5
5	Θ_1	—	Θ_3	Θ_4	Θ_5
6	—	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5
7	Θ_1	Θ_2	Θ_3	—	—
8	Θ_1	Θ_2	—	Θ_4	—
9	Θ_1	Θ_2	—	—	Θ_5
10	Θ_1	—	Θ_4	Θ_4	—
11	Θ_1	—	Θ_3	—	Θ_5
12	Θ_1	—	—	Θ_4	Θ_5
13	—	Θ_2	Θ_3	Θ_4	—
14	—	Θ_2	Θ_3	—	Θ_5
15	—	Θ_2	—	Θ_4	Θ_5
16	—	—	Θ_3	Θ_4	Θ_5
17	Θ_1	Θ_2	—	—	—
18	Θ_1	—	Θ_3	—	—
19	Θ_1	—	—	Θ_4	—
20	Θ_1	—	—	—	Θ_5
21	—	Θ_2	Θ_3	—	—
22	—	Θ_2	—	Θ_4	—
23	—	Θ_2	—	—	Θ_5
24	—	—	Θ_3	Θ_4	—
25	—	—	Θ_3	—	Θ_5
26	—	—	—	Θ_4	Θ_5
27	Θ_1	—	—	—	—
28	—	Θ_2	—	—	—
29	—	—	Θ_3	—	—
30	—	—	—	Θ_4	—
31	—	—	—	—	Θ_5

та процедурою їх обчислення, крім того, вони представляють цілісну функцію. Тому функція $m(t_i, \Theta_j)$ має розглядатися в різних варіантах. Клас поліноміальних степеневих моделей (4) не вище другого порядку ($|n| \leq 2$) з від'ємними показниками включає $m = 31$ варіантів, розділених на п'ять підкласів за кількістю параметрів Θ_j в кожному. Ці варіанти представлені в табл. 3, починаючи з повної моделі у формі (5).

Реалізація принципу самоорганізації для конкретних даних забезпечує вибір адекватної моделі. Суть цього принципу полягає в переборі моделей-претендентів з одного чи з різних класів, враховуючи наступні кроки аналізу даних, їх фізичну

змістовність при причинно-наслідковому дослідженні самого явища. В результаті такого перебору визначаються параметри адекватного варіанта моделі, який відповідає прийнятим критеріям.

Складність вибору самих критеріїв полягає в тому, що необхідно визначити як внутрішні, так і зовнішні критерії адекватності [6]. Внутрішні критерії забезпечують вибір варіантів всередині класу, а зовнішні використовуються для остаточного відбору між представниками всіх класів. Внутрішні критерії використовують інформацію, отриману з даних при визначенні параметрів моделі. Як критерії можуть виступати відстані, суми квадратів відхилень, суми модулів тощо. Зовнішні критерії розраховуються на додатковій інформації, яка не використовувалась при оцінці параметрів моделі. Зовнішніми критеріями є інтерпретованість, кількість параметрів, прогностична властивість, обчислювальні можливості. Проблема вибору критеріїв достатньо повно висвітлена в роботах [5, 6].

Наведений тут підхід описує одновимірний випадок узагальненої характеристики часових витрат операторської діяльності. На основі цього підходу розробляється математична модель динаміки оперативності конкретного оператора.

Оскільки тренд показника оперативності навіть для досвідченого оператора має U-подібну форму, його модель легко знайти у класі поліномів (3) серед підкласів, які виділені за кількістю параметрів Θ_j в кожному. В процесі перебору методом найменших квадратів розраховують параметри всіх моделей претендентів і на основі внутрішніх критеріїв відбирається адекватний варіант в кожному з підкласів. Для цього за внутрішній критерій можемо прийняти мінімальне значення евклідової відстані [1]

$$d(y_i, y_{mi}, n) = \left(\sum_{i=1}^n (y_i - y_{mi})^2 \right)^{1/2}, \quad (6)$$

де y_i , y_{mi} реальне і змодельоване значення показника відповідно, $i = 1, 2, \dots, n$.

Вибір конкретного робочого варіанта серед підкласів здійснюють за зовнішнім критерієм, наприклад максимально допустимої простоти — (мінімальної кількості параметрів). Це виправдано тим, що в слідкуючих системах контролю, особливо в тих, в яких слідкування здійснюється відносно узагальненої індивідуальної моделі оператора, біжучу модель можна ідентифікувати за окремими її фрагментами, описуючи їх більш елементарними моделями з невеликою кількістю параметрів, використовуючи при розрахунку і відборі ті ж самі критерії — евклідову відстань та допустиму простоту.

Загальними характерними особливостями кожного з підкласів є наступні. Модель першого підкласу, яка відповідає повній моделі (5), найточніше описує дані, проте вона здатна перебирати на себе коливальність тренду, а в обчисленнях є найбільш громіздкою. Моделі другого підкласу мають дещо послаблені характеристики і є ефективними у випадку довгих рядів. Моделі третього підкласу є трикомпонентними, вони достатньо гнучкі і по відношенню до коливної складової $h(t)$ здатні відтворювати лише фрагменти дуже низькочастотних складових, співмірних з характером самої тенденції. Моделі четвертого підкласу є досить простими і виражають лінійні або нелінійні фрагменти тренду; моделі п'ятого вважаємо примітивними, які слід використовувати для опису коротких монотонних фрагментів тенденції.

5. МАРКОВСЬКА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОПЕРАТОРА

Зв'язок поведінки моделі $y(t)$ з рівняннями працездатності оператора в загальному має випадковий характер. В процесі реєстрації даних окремі їх значення чи група значень можуть в силу тих чи інших причин виявитися надто великими, що спричинить різке зниження працездатності оператора. Таку зміну характеру даних можна розглядати як випадковий марковський процес на множині рівнів працездатності на підставі властивості

$$p\{m(t_k) = c_k; m(t_{k-1}) = c_{k-1}, m(t_{k-2}) = c_{k-2}, \dots,$$

$$m(t_{k-1}) = c_{k-1}\} = p\{m(t_k) = c_k; m(t_{k-1}) = c_{k-1}\}, \quad (7)$$

тобто біжучий стан c_k практично залежить лише від попереднього. Вимогу дискретності визначимо як відображення розмаху тренду $[\min(m(t)), \max(m(t))]$ на множині інтервалів $c_k = c(\delta t_k)$, де $\delta t_k \in [t_{k+1}, t_k]$, фаз функціонального стану без першої і останньої фази. В межах границь інтервалів, тобто в коридорах, паралельних абсцисі, усереднюємо значення $m^*(t) = 0.5[m(t_{k+1}) - m(t_k)]$ і приймаємо постійним, а функціональний стан оператора протягом часу $t_{k+1} - t_k$ таким, що відповідає даній фазі.

Ймовірності p_i локалізації тренду $m(t)$ у вказаних коридорах визначимо з диференціального рівняння

$$\frac{dp_i}{dt} = -\mu_i p_i(t) + \mu_{i-1} p_{i-1}(t), \quad (8)$$

де $\mu_r = 0$ при $r \leq 1$ — усереднена інтенсивність переходу з даного коридору в сусідній.

Розв'язки цього рівняння при найбільш загальних умовах $p_i(t=0) = p_i$, $i = 1, 2, \dots, k$, запишемо у формі

$$\frac{dp_i}{dt} + \mu_i p_i(t) = \mu_{i-1} p_{i-1}(t). \quad (9)$$

Рівняння (8) є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Враховуючи початкові умови, його розв'язки можна отримати з допомогою рекурентної формули

$$p_i(t) = \frac{\mu_{i-1}}{\mu_i - \mu_0} p_{i-1}(t) + \left[p_i + p_0 \frac{\prod_{k=0}^{i-1} \mu_k (-1)^i}{\prod_{k=0}^{i-1} (\mu_i - \mu_k)} - \sum_{k=1}^{i-1} p_k(t) \prod_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\mu_j}{\mu_i - \mu_j} \right) \right] \exp(-\mu_i t). \quad (10)$$

Ймовірність знаходження значень тренду $m(t)$ в найвищому коридорі визначимо з умови нормування

$$\sum_{j=1}^k p_j(t) = 1. \quad (11)$$

При контролі значень тренду $m(t)$ інтенсивність μ_i переходів може бути знайдена як тангенс кута нахилу спрямованого в межах коридору фрагмента $m(t_{i+1}) - m(t_i)$. Інтенсивність μ_i також є інформативним параметром, оскільки вона характеризує локальну динаміку тренда.

Співвідношення (8) і (9) дозволяють визначити ймовірності

$$p\{c = c_k\} = p\{m(t) = m(t, c_k)\} = p_k(t), \quad (12)$$

рівня працездатності оператора в конкретній фазі функціонального стану. Значення фаз функціональних станів в основному фігурує як підтвердження реальної працездатності. Іншими словами, ймовірність перебування оператора на рівні зниженої працездатності у фазі III повинна бути меншою, ніж у фазах IV або V.

ВИСНОВОК

На основі аналізу загальних представлень діяльності космонавта-оператора на пілотованих космічних системах та базових узагальнених математичних моделей операторської діяльності в наземних системах виділено оперативність як один з головних показників якості роботи оператора. Цей показник є основним при оцінюванні часових витрат при ви-

борі, прийнятті та реалізації рішень оператором. Інтерпретація цього показника відображена у взаємозв'язку функціонального стану і працездатності. На базі узагальненої математичної моделі діяльності оператора в людино-машинному інтерфейсі запропоновано підхід на основі принципу перебору варіантів моделей, який практично синхронно з ходом роботи оператора забезпечує формалізацію отримуваних даних у вигляді моделі їх тенденції, та уточнити розрахунок ймовірностей рівнів працездатності оператора в конкретних фазах функціонального стану. Наведені математичні моделі можуть бути використані при проектуванні та експлуатації систем біжучого контролю якості операторської діяльності та робочого стану операторів як в наземних системах керування, так і на підготованих космічних станціях.

Отримані результати дають змогу забезпечити алгоритми біжучого контролю опорними моделями, на основі яких визначаються кількісні характеристики операторської діяльності і приймається рішення про підтримку чи заміну оператора при виході цих показників за встановлені межі. Слід зазначити, що на вид класу моделей та вибір критеріїв адекватності моделей практично не накладається строгих обмежень, крім коректного математичного обґрунтування в даній ситуації та контролюючій системі.

1. Гамбаров Г. Н., Мандель И. Д., Рыбина И. А. О некоторых метриках, возникающих в задачах обработки данных // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 12. — С. 116 — 129.
2. Данилова Н. Н., Крылова А. Л. Физиология высшей нервной деятельности. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — 399 с.
3. Зараковский Г. М., Корольов Б. А., Медведев В. И. и др. Введение в эргономику / Под ред. В. П. Зипченко. — М.: Сов. радио, 1974. — 352 с.
4. Зараковский Г. М., Павлов В. В. Закономерности функционирования эргатических систем. — М.: Радио и связь, 1987. — 232 с.

5. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. — Київ: Наук. думка, 1982. — 296 с.
6. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. — Київ: Техніка, 1985. — 223 с.
7. Котик М. А. Курс инженерной психологии. — Таллин: Валгус, 1978. — 364 с.
8. Леонова А. Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. — 200 с.
9. Навакатиян А. О., Крыжановская В. В., Кальниш В. В. Физиология и гигиена умственного труда. — Київ: Здоров'я, 1987. — 152 с.
10. Ставицкий К. Р., Государев Н. А. Методы контроля психической работоспособности и эмоциональной активности // Гигиена и санитария. — 1984. — № 11. — С. 48 — 49.
11. Стрюков Г. А., Грицевский М. А. Работоспособность человека // Гигиена труда и проф. заболевания. — 1973. — № 10. — С. 41 — 43.
12. Jinhua Cao. Stochastic behavior of man-machine system operating under changing environment subject to a markov process with two states // Microelectron. and Reliab. — 1989. — 29, N 4. — P. 529 — 531.
13. Kaminsky R. M., Hrytsyk V. V. Generalized system model of man-machine interface for image processing // Pattern Recogn. and Image Analysis. — 1995. — 3. — P. 53 — 56. — (Proc. of Therd Intern. Conf.)
14. Pham Dinh Tuan. Time series analysis and biology // Lect. Notes Biomath. — 1983. — 49. — P. 368 — 387.
15. Rahim M. A., Raouf A., Lashkari R. S., A three-state Markovian model for predicting human reliability // Kybernetes. — 1985. — 14, N 2. — P. 87 — 91.

MODELLING THE ASTRONAUT OPERATIVITY DYNAMICS IN CONDITION DURABLE STAY IN PILOTAGE SYSTEMS

R. M. Kaminskyi

We present a mathematical approach and models for identification and the working conditions activity quality of an astronaut-operator in the man-machine interface of control systems in complex technological processes. We present a time-series model for the dynamics of the efficiency of choosing, making and realization decisions and markovian model for determining the probability of concrete working conditions of the operator. The models are oriented to servosystems of operator activity identification immediately at his work station.

НАШІ АВТОРИ

АЙЗЕНБЕРГ Ігор Наумович — керівник Ужгородської лабораторії нейромереж, обробки зображень і розпізнавання образів Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України. Напрямок науки — нейромережі, порогова логіка, математичне моделювання, обробка зображень, розпізнавання образів.



БЕЛЯЄВ Віктор Павлович — старший викладач Державного університету «Львівська політехніка». Напрямок науки — математичне моделювання стохастичних систем, автоматизація проектування.



ВОЛОЧІЙ Богдан Юрійович — доцент Державного університету «Львівська політехніка», кандидат наук. Напрямок науки — системно-технічне проектування радіоелектронних систем і комплексів.

БУНЬ Ростислав Адамович — заступник директора з науково-дослідної роботи та керівник відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, доктор технічних наук. Напрямок науки — інформаційні технології моделювання складних нелінійних систем, числові методи розв'язування жорстких систем диференціальних рівнянь вищих порядків.



ВОРОБЕЛЬ Роман Антонович — старший науковий співробітник Фізико-механічного інституту імені Г. В. Карпенка НАН України, кандидат технічних наук. Напрямок науки — цифрова обробка зображень.



ВАЛЬКОВСЬКИЙ Володимир Олександрович — завідувач відділу Науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, професор Державного університету «Львівська політехніка», доктор фізико-математичних наук, професор. Напрямок науки — паралельна обробка інформації, перспективні інформаційні технології.



ГЕЧЕ Федір Елімірович — доцент Ужгородського університету, за сумісництвом працює в Ужгородській лабораторії нейромереж, обробки зображень і розпізнавання образів Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури. Напрямок науки — порогова логіка, математичне моделювання, обробка дискретних сигналів і зображень, розпізнавання образів.

ВОЙЧИШИН Казимир Станіславович — старший науковий співробітник Фізико-механічного інституту Національної академії наук України, керівник наукового відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, член наукового товариства імені Т. Г. Шевченка, нагороджений медаллю Е. Цюлковського.



Напрямок науки — моделювання, аналіз, апроксимація і екстраполяція часових рядів з ритмічною і циклічною структурою при розв'язуванні проблеми прогнозів сонячно-земних зв'язків.



ГРЕНЬ Ярослав Володимирович — аспірант Державного університету «Львівська політехніка», магістр. Напрямок науки — автоматизація досліджень.

ГРИЦИК Володимир Володимирович — директор Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, керівник Секції інформатики Західного наукового центру Національної академії наук України, завідувач кафедри інформатики державного університету «Львівська політехніка», кандидат фізико-математичних наук, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України.

Напрямок науки — інформаційні технології і системи високоефективних систем обробки інформації в реальному часі.



ГУСТІ Микола Іванович — аспірант Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України.

Напрямок науки — інформаційні технології моделювання складних нелінійних систем.



ДЕРКАЧ Богдан Теодорович — провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — розробка алгоритмічного та програмного забезпечення високопродуктивних систем обробки інформації.



ДЖИЦІМСЬКИЙ Здіслав — заступник директора Інституту телекомунікації ТСА, Бидгощ, Польща, доктор технічних наук.

Напрямок науки — телекомунікація та цифрова обробка сигналів.



ДРАГАН Ярослав Петрович — професор кафедри Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теорія зображень моделей стохастичних сигналів і застосування до аналізу коливань у складних системах різної природи.



ЗЕРБІНО Дмитро Дмитрович — асистент кафедри «Автоматизовані системи управління» Державного університету «Львівська політехніка».

Напрямок науки — моделі паралельної обробки інформації нижнього рівня, клітинні автомати.



КАМІНСЬКИЙ Роман Миколайович — керівник відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — людино-машинні системи обробки та розпізнавання зображень.



КИСІЛЬ Богдан Васильович — старший науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, кандидат фізико-математичних наук, керівник лабораторії Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України.

Напрямок науки — обробка та розпізнавання зображень, паралельна обробка інформації.



КОВАЛЬ Олексій Ігорович — інженер відділу теорії та систем розпізнавання зображень динамічних об'єктів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Напрямок науки — цифрова обробка сигналів та зображень.



МИКИТИН Галина Василівна — молодший науковий співробітник Фізико-механічного інституту імені Г. В. Карпенка НАН України, кандидат технічних наук. Напрямок науки — вимірні стохастичні системи і сигнали, метрологія, стандартизація.



КОСАРЕВИЧ Ростислав Ярославович — інженер відділу теорії та систем розпізнавання зображень динамічних об'єктів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Напрямок науки — цифрова обробка сигналів та зображень.



ОЛЕКСІВ Богдан Ярославович — керівник відділу Державного науково-дослідного інституту Національного агентства з питань інформатизації при Президенті України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — інформаційні технології і системи, паралельна обробка інформації, паралельне програмування, синтез багатопроцесорних обчислювальних та нейророботичних систем, штучний інтелект.



КРАВЕЦЬ Ігор Іванович — науковий співробітник відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України.

Напрямок науки — розробка високоефективних систем збору, обробки та відтворення інформації, радіотехнічних систем.



ОПОТЯК Юрій Володимирович — науковий співробітник відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — інформаційні технології високопродуктивної обробки інформації, системи збору та обробки інформації.

ЛІЩЕНЮК Віталій Ігорович — інженер Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України.

Напрямок науки — інформаційні технології моделювання складних нелінійних систем.



МАНДЗІЙ Богдан Андрійович — завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Державного університету «Львівська політехніка», доктор наук.

Напрямок науки — автоматизація проектування радіоелектронних засобів.



ПОГРІБНИЙ Володимир Олександрович — завідувач відділу Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, професор Інституту телекомунікації ТСА, Бидгощ, Польща, доктор технічних наук, академік Міжнародної академії інформатизації та Української академії інформатики.

Напрямок науки — цифрова обробка сигналів.



ПОПОВ Богдан Олександрович — завідувач відділу Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, професор кафедри обчислювальної математики Львівського державного університету, доктор фізико-математичних наук. Напрямок науки — перетворення інформації з метою зменшення обсягу сигналу, компактного представлення параметрів фізичних процесів, розробки ефективного математичного забезпечення.



ТАЯНОВ Сергій Анатолійович — аспірант Державного університету «Львівська політехніка», магістр. Напрямок науки — автоматизація досліджень.



РОЖАНКІВСЬКИЙ Ігор Володимирович — доцент кафедри АКМ Державного університету «Львівська політехніка», доктор технічних наук. Напрямок науки — телевізійне зображення та обробка електричних та магнітних сигналів.



ЧИНОК Віктор Миколайович — керівник лабораторії прикладних комп'ютерних технологій Державного науково-дослідного інституту інформаційної інфраструктури Національної академії наук України. Напрямок науки — автоматизація наукових досліджень та технологічних процесів.



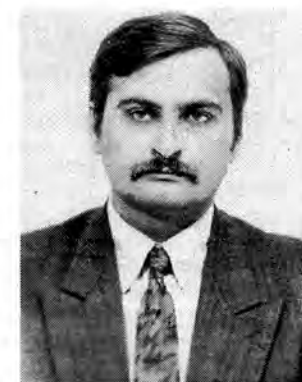
РУСИН Богдан Павлович — завідувач відділу теорії та систем розпізнавання зображень динамічних об'єктів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, старший науковий співробітник, доктор технічних наук. Напрямок науки — високопродуктивні інформаційні технології та системи для синтезу, обробки та розпізнавання складноструктурованих зображень різної фізичної природи.



ЯВОРСЬКИЙ Богдан Іванович — завідувач кафедри Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, кандидат технічних наук. Напрямок науки — теоретичні принципи і розроблення апаратури для біомедичних космічних та гідрофізичних досліджень.



СОБУЛЬСЬКИЙ Анджей — інженер Інституту телекомунікації ТСА, Бидгощ, Польща, магістр. Напрямок науки — цифрова обробка сигналів.



ЯЦКІВ Дмитро Ярославович — старший науковий співробітник відділу космічної геодинаміки Головної астрономічної обсерваторії НАН України, кандидат фізико-математичних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки. Напрямок науки — імпульсні лазерні системи, лазерна локація штучних супутників Землі.

За даними JPL NASA та ESA в INTERNET

GALILEO: від Європи до Каллісто

Юпітеріанський зонд GALILEO (KHIT, 1997, 3, № 3/4), запущений в жовтні 1989 року, за два роки повністю виконав заплановану програму дослідження атмосфери планети. Отримані в 1996-1997 рр. при перших наближеннях до супутників Юпітера дані та відмінний стан КА дозволили продовжити дослідження. В 1998 році місія GALILEO перейшла до етапу вивчення супутників планети. Етап розрахований на два роки і передбачає 10 наближень до Європи (останнє з запланованих успішно завершено 31 січня 1999 року), 4 наближення до Каллісто та 2 наближення до Іо.

Головна мета досліджень Європи — встановити чи існує рідкий океан під крижаною корою поверхні супутника. Виявлення на знімках поверхні Європи досить великих відносно рівних ділянок без кратерів поруч з рифтовими полями свідчить про значно тонший і молодший шар криги ніж вважалося досі. Тому можливе існування підповерхневого океану.

Порівняння зображень з VOYAGER і GALILEO дозволяє відслідковувати зміни в часі поверхонь супутників. На отриманих на протязі 1998 року знімках Європи помітні деталі, які свідчать про інтенсивні геологічні деформації: темні ділянки розламаної та перевернутої криги, темну смугу, вздовж якої йдуть розломи, подрібнення крижаної кори та вивернення підстилаючого матеріалу. Один з розломів поблизу південного полюса Європи, т.з. Astypalaea Linea, завдовжки з каліфорнійський сегмент відомого розлому Сан-Андреас на Землі. Його повна довжина складає 810 км. На знімках виявлено ділянку розлому довжиною біля 50 км, на якій в минулому відбувалися поздовжні рухи блоків кори в протилежних один одному напрямках. В місцях, де ці рухи зустрічали коліна розлому, відбувалося ніби розтягнення поверхні в поперечних напрямках, що створювало передумови для виходу на поверхню підповерхневих більш теплих шарів та формування полів відносно нової криги в границях початкового розлому. Загальний поздовжній рух протилежних боків розлому викликав появу середньої вузької тріщини на всьому його протяжінні, в місцях розтягнення поверхні вона набувала виду сходиночок.

Найімовірнішою причиною рухів в ділянці розлому вважаються припливні деформації крижаної кори під впливом гравітації Юпітера.

На поточний момент після завершення програми вивчення Європи виконується коригування траєкторії КА для виконання зближення з другим за розмірами супутником Юпітера Каллісто. 4 зближення з Каллісто повинні відбутися в травні-вересні 1999 року.

Аналіз магнітометричних даних GALILEO зафіксував зміни магнітного поля Європи, що викликані хаотичним протіканням електричних струмів поблизу поверхні планети. Власне це й дало можливість запідозрити існування рідкого океану під поверхнею криги, адже джерелом зарядів може бути шар розтопленого соляного розчину. Підтвердженням цього за магнітометричними даними є постійна зміна напрямків струмів, узгоджена з ефектами обертання Юпітера. Повторний аналіз магнітометричних даних, отриманих для Каллісто, несподівано виявив аналогічні ефекти. Тобто Каллісто може виявитись другим місяцем Юпітера з солоним океаном під крижаною корою. Тим не менше, не зважаючи на вагомі дані на користь цієї гіпотези, вчені не схильні розглядати Каллісто як ще одне можливе джерело виникнення життя в Сонячній системі. Адже розігрівання океанів на Каллісто у протилежність Європі йде не за рахунок припливного тертя, а за рахунок радіоактивних елементів.

У світлі нових даних почато повторний аналіз магнітометричних даних для Ганімеда з метою виявлення аналогічних ефектів.

Після візиту КА до Каллісто його орбіта буде дистанційно скоригована так, щоб наприкінці року він підійшов до Іо, найближчого з супутників Юпітера, і пройшов через так званий тор Іо — хмару заряджених частинок навкруги її орбіти.

Висота наближення зонду до поверхні Іо складатиме від 300 до 500 км. В його програму входить картографування з роздільною здатністю 6 м викидів сірки та інших хімічних сполук з вулканів супутника, а також вивчення змін інтенсивності радіації Юпітера з наближенням до нього.

Серед найважливіших надбань місії GALILEO можна вважати:

- відкриття наявності магнітного поля навкруги найбільшого супутника Юпітера Ганімеда;
- відкриття крижаних вулканічних потоків та подрібненої криги на поверхні Європи, що свідчить про наявність рідкого океану під її поверхнею;
- спостереження водних випаровувань та аврори на Юпітері;
- відкриття атмосфери, що складається з водню та двоокису вуглецю на Каллісто;
- наявність металевих ядер у Європі, Іо та Ганімеда та свідчення про відсутність такого у Каллісто;
- свідчення дуже потужної вулканічної діяльності на Іо та швидких змін деталей її поверхні за період роботи зонда.

ISO — головне надбання десятиріччя в інфрачервоній астрономії

В квітні 1998 року завершила свою роботу місія ISO (Infrared Space Observatory), яка була запущена ESA в 1995 році з метою дослідження наявності водної пари та криги в космічному просторі та на небесних тілах, наявність котрих відіграє велику роль в процесах формування зірок (KHIT, 1995, 1, № 2/6.). Супутник складався з кріостата на рідкому гелії, телескопа з первинним дзеркалом діаметром 60 см, сервісних модулів та був обладнаний фотополариметром ISOPHOT, відеокамерою ISOCAM, короткохвильовим спектрометром SWS та довгохвильовим спектрометром LWS. За допомогою кріостату телескоп та інструменти підтримувались в охолодженому стані при температурах близьких до абсолютного нуля -271°C .

Головним результатом більш ніж успішної роботи обсерваторії було встановлення того, що вода є достатньо поширеною у всесвіті сполукою. За допомогою SWS знайдено молекули водяної пари поблизу старої зірки W Hydrae, зареєстроване яскраве інфрачервоне джерело GF 2591 навкруги новоутвореної масивної зірки. На LWS вперше зареєстрована водяна пара, що утворилася в результаті світлових ударних хвиль, породжених газовими струменями від молодих зірок (джерело HH-54). На цьому ж спектрометрі виконані спостереження об'єкту IRAS 16293-2422, в якому, як передбачається, йде формування зірки типу Сонця. При цьому чітко зареєстрована характерна емісія водяної пари на 108, 113, 174 і 179 мкм. При дослідженнях центру Галактики замість випромінювання знайдені лінії поглинання на довжинах хвиль водяної пари. Це свідчить про наявність темних холодних молекулярних хмар, які є первинним джерелом утворення нових зірок. Біля яскравого інфрачервоного джерела Sagittarius B2, близького до центру Галактики, також знайдені сліди водяної пари.

Точність спостережень LWS настільки велика, що він дає змогу розрізнити окремі молекулярні хмари в напрямку до галактичного центра та знайти швидкість їх переміщення відносно Землі за доплерівськими збуреннями в довжинах хвиль водяної пари.

Спостереження зовнішніх планет Сонячної системи за допомогою SWS на довжинах хвиль 28.43—44.19 мкм показали наявність молекул води в верхніх шарах атмосфер Сатурна, Урана та Нептуна і поставили питання про її походження. При формуванні цих планет вони отримали достатню кількість води, яка тим не менше не могла опинитися у зовнішніх шарах їх атмосфер завдяки процесам, які відбуваються в середині планети. Тому джерело постачання води може бути тільки зовнішнє. Ним можуть виявитись комети, що складаються з великої кількості криги і в разі зіткнення з планетою збагачують водою її атмосферу, як це було з кометою Шумейкера—Леві в 1994 році.

За допомогою відеокамери ISOCAM отримано близько 90 зображень Юпітера на різних довжинах хвиль від 2.3 до 11.6 мкм, що дало поширену картину атмосфери планети. На довжині 3.3 мкм зображення Юпітера зникло за рахунок поглинання метаном інфрачервоного випромінювання планети. Зображення поблизу 5 мкм показали наявність в атмосфері ділянок, вільних від хмар, де ISOCAM зміг отримати знімки більш глибоких шарів. Верхні шари атмосфери добре спостерігались на хвилях 7.7 мкм.

Велика Червона Пляма добре розпізнавалась на нижньому кінці діапазона. Зокрема, спостереження ISO допомогли засувати результати, отримані зондом, що був відправлений з GALILEO, та потрапив в одне з вільних від хмар сухих вікон антициклону, видиме на хвилях 5 мкм.

Супутник працював на орбіті на 10 місяців більше ніж за попередніми розрахунками і перестав функціонувати після повного випаровування 2000 літрів гелію, що застосовувався для охолодження. Додатковий час дав змогу астрономам отримати виключно цікаві спостереження ділянок зореутворення в хмарах сузір'їв Оріона і Тельця.

За оцінками групи американських астрономів результати, отримані ISO, є головною подією десятиріччя в інфрачервоній астрономії.

Deep Space — технології 21 сторіччя

В жовтні 1998 року NASA запущено на орбіту довкола Сонця КА Deep Space 1 (DS1). На борту апарата знаходяться дві новітні розробки, що вперше проходять випробування в космічному просторі: великі сонячні антени з 720 циліндричними лініями Френеля для концентрації світла на 3600 сонячних комітках (проект SCARLET) та малий високочастотний радіопередавач для глибокого космосу. На поточний момент обидві працюють в розрахунковому режимі тестування. На КА встановлений розроблений спеціально для місії іонний двигун нового типу. Двигун пройшов заплановані тести в листопаді 1998 року, але на робочий режим не вийшов. Після тривалих досліджень причин відмови було створено нове програмне забезпечення для його запуску, який успішно відбувся наприкінці листопада.

DS1 несе на собі нову автономну навігаційну систему AutoNav, що також є однією з 12 розробок, що тестуються. Вона визначає положення КА в Сонячній системі шляхом спостереження декількох астероїдів з відомими орбітами на тлі зірок та коригує його в разі необхідності, подаючи відповідні команди системі іонних двигунів.

Встановлене на DS1 обладнання для проведення досліджень космічної плазми дозволяє проводити одночасні з КА CASSINI (KHIT, 1998, 4, № 2/3) спостереження сонячного вітру.

DS1 — перший запуск в рамках довгострокового проекту New Millennium Program, головною метою якого є випробування новітніх технологій для їх використання в космічних дослідженнях 21 сторіччя.

Mars Polar Lander: Марс на смак та колір

Місія Mars Polar Lander була запущена 3 січня 1999 року з мису Канаверал (США, Флоріда), маючи на меті дослідження водяного циклу Марса поблизу його південної полярної зони (73°—76° південної широти) з поверхні планети. Політ продовжуватиметься 11 місяців. Під час спуску на планету буде виконуватись фотографування поверхні планети з високою роздільною здатністю для визначення геологічного та фізичного середовища місця посадки.

Після приземлення за допомогою роботизованих маніпуляторів та двох мікрозондів планується отримати проби ґрунту на глибині до одного метра для досліджень кліматичної історії планети та виконати їх первинний хімічний аналіз на вміст води, газів та пилу, а також провести вимірювання поверхневої температури, вітрів, тиску, кількості пилу в атмосфері та інші метеорологічні дослідження.

Mars Global Surveyor: широкомасштабне картографування Марса

Місія Mars Global Surveyor, запущена в грудні 1996 року, є складовою частиною програми дослідження Марса Mars Surveyor Program і вже третій рік працює на орбіті навколо планети. По завершенні першої фази програми досліджень КА встановився на тимчасовій еліптичній полярній орбіті (найбільше наближення 170 км над поверхнею, 11.5 годин обертання) з періодичним зануренням в найвищі шари марсіанської атмосфери для продовження збору наукових даних.

Вперше за весь час досліджень Марса отримані дані про повну еволюцію марсіанської пилової бурі гігантських розмірів. Дані Surveyor свідчать, що буря почалася як низка малих за розмірами бур вздовж краю південної полярної шапки, які пізніше злились в єдине явище, що розтягнулось на 180° за довготою та 20° за широтою. За допомогою теплового емісійного спектрометра (ТЕС) отриманий поверхневий розподіл температур та непрозорості атмосфери. Вплив бурі в атмосфері відчувався на значних висотах (до 80 км) у вигляді підвищеної густини та перемінності атмосфери, що впливало навіть на орбіту КА. Перед самою бурсю атмосферний пил був розподілений майже однорідно. Атмосферна турбуленція порушила раніше стабільний стан захмарення завдяки великим викидам пилу в атмосферу.

Магнітометричні вимірювання надали нові дані про локалізацію магнітних полів. Зокрема були знайдені ділянки марсіанської кори з аномально сильним магнітним полем, що вказує на наявність у Марса в минулому такого ж сильного глобального магнітного поля, як у Землі. Такі структури малих розмірів (до 50 км) були знайдені тільки в ділянках старих кратеризованих територій.

Завдяки знімкам стін каньйонів, кратерів та долин кора планети виявилась значно більше стратифікованою і на більшу глибину, ніж вважалося досі. Поки ще невідомо, якими саме породами складені ці страти. Інфрачервоні емісійні спектри поверхні показали наявність піроксена та плагіоклаза — мінералів, загальних для вулканічних порід. Не знайдено ні карбонатних мінералів, ні глини, ні кварца. Якщо вони і присутні в цих породах, то їх вміст складає не більше 10 %. Найбільші плити затверділої вулканічної лави виявлені поблизу північного полюса планети. Невелика кількість імпактних кратерів на цих плитах свідчать про їх відносну молодість.

Отримані за допомогою ТЕС дані щодо акумуляції поблизу екватора мінерала гематита, кристалізованого оксида заліза, який зазвичай виникає в місцях гідротермальної активності, незаперечно свідчать про наявність в минулому на Марсі стабільної води на/або поблизу поверхні, а також про існування на ранніх стадіях історії планети атмосфери більшої потужності.

За допомогою лазерної альтиметрії вперше отримане тривимірне зображення північної полярної шапки Марса. Більше ніж 50 000 топографічних вимірів дали вихідні профілі з великою кількістю дрібних деталей топології каньйонів. Наприкінці 1998 року були розпочаті чергові маневри коригування орбіти КА з тим, щоб в березні 1999 року він перейшов на розрахункову кругову орбіту над полюсами з періодом обертання 2 години для глобального картографування поверхні Марса на протязі двох років.