

НАЦІОНАЛЬНЕ  
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО  
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІСТОРІЯ - АКТУАЛЬНІСТЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ

Академічні та науково-технічні публікації  
засновані на результатах дослідження  
історичного та сучасного стану  
науково-технічного розвитку косміки

КИЇВ

АРХІВ 5, № 5/6, 1999

KYIV

## ЗМІСТ

Корепанов В., Негода О., Лізунов Г., Алляйн Г., Баліхін М.,  
Бленскі Я., Дудкін Ф., Федоров А., Юхневич Іо., Клімов С.,  
Красносельських В., Лефевр Ф. Проект ВАРИАНТ: вимірювання  
електромагнітних полів та електричних струмів в іоносферній плазмі на супутнику «Січ-1М»

Федоровський А. Д. К вопросу дешифрирования космических  
снимков природных ландшафтов

Русин Б. П., Мосоров В. Я. Розвиток алгоритмів безвтратної  
компресії зображень на основі аналізу перепадів яскравості

Александров Е. Е., Рафалович О. Я. К выбору мощности  
бортового передатчика космических станций для цифровых  
систем спутниковой связи

Хода О. А. Программное обеспечение «Klio» для определения  
параметров ионосферы

## CONTENTS

- 3 Korepanov V., Negoda O., Lizunov G., Alleyne H., Balikhin M., Blecky J., Dudkin F., Fedorov A., Juchniewich J., Klimov S., Krasnoselskikh V., Lefevre F. Project VARIANT: Measurements of electromagnetic fields and currents in the ionospheric plasmas aboard the Sich-1M satellite
- 9 Fedorovsky A. D. On the interpretation of space images of natural landscapes
- 16 Rusyn B. P., Mosorov V. Ya. Development of lossless image compression algorithms based on the analysis of brightness differences
- 21 Alexandrov Ye. Ye., Rafalovich O. Ya. Choosing the power of airborne transmitters in the space stations for digital satellite communication systems
- 25 Khoda O. Klio software for the estimation of the ionospheric parameters

- Жалило А. А.** Методический подход и алгоритмы реализации дифференциального метода спутниковой навигации по наблюдениям сети контрольных станций
- Мартыш Е. В.** Влияние эмиссии радона, предшествующей землетрясению, на параметры нижней ионосфера
- Дегтярьов В. В.** Вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту
- Тимошенко В. І., Агарков А. В., Мошненко Ю. І., Сиренко В. Н., Кнышенко Ю. В., Ляшенко Ю. Г.** Проблемы терmostатирования и обеспечения сохранности космического аппарата в период предстартовой подготовки и при выведении на орбиту
- Хорошилов С. В., Шаповаленко В. В.** К вопросу построения и решения уравнений колебаний криволинейных стержневых пространственных конструкций космического применения
- Мазманишвили А. С.** Прием фазовоманипулированных сигналов оптического диапазона квантовым счетчиком
- Карачун В. В., Потапова Е. Р., Мельник В. Н., Астапова А. Б.** О погрешности курсоуказания ракет-носителей
- Харченко В. С., Зенин А. П., Склар В. В.** Методы многопараметрической адаптации бортовых управляющих и вычислительных систем с раздельным мажоритарным резервированием
- Черняк М. Г., Бондаренко О. М., Коваленко Т. В.** Фізико-математичне моделювання вимірювальних перетворювачів тиску з пневмомеханічним резонатором
- Харченко В. С., Гридин Ю. В.** Модель функционирования бортовых вычислительных систем с категорированием задач в условиях сбоев и отказов аппаратных и программных средств
- Хоркавців О. Я., Демків О. Т.** Гравітропна реакція протонемами моху *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. та її модифікації світлом
- Диденко Л. Ф., Пархоменко Н. І., Максименко Л. А., Дяченко Н. С., Заріцкий Н. М., Козар Ф. Е.** Влияние клиностатирования на вирус курчавой карликовости картофеля *in vitro* и *in vivo*
- 33** *Zhalilo A. A. Methodological approach and algorithms for the realization of a differential method of satellite navigation based on the observations of reference station network*
- 45** *Martysh E. V. The influence of the radon emission preceding earthquakes on the lower-ionosphere parameters*
- 52** *Degtyaryov V. V. The measurement of the axial quadrupole magnetic moment*
- 56** *Timoshenko V. I., Agarkov A. V., Moshnenko Yu. I., Sirenko V. N., Knyshenko Yu. V., Lyashenko Yu. G. Problems of thermostatic control and spacecraft safety at the pre-launch period and during orbital injection*
- 65** *Khoroshilov S. V., Shapovalenko V. V. On setting up and solving the equations of oscillations in curvilinear three-dimensional rod constructions destined for space application*
- 71** *Mazmanishvili A. S. Receiving phase-keyed optical signals via quantum detector*
- 77** *Karachun V. V., Potapova E. R., Mel'nik V. N., Astapova A. B. On the fault in the course indication of carrier rocket*
- 81** *Kharchenko V. S., Zenin A. P., Sklyar V. V. Methods of the multiparametric adaptation of spaceborne control and computing systems with separate majority reservation*
- 92** *Chernyak M. G., Bondarenko O. M., Kovalenko T. V. Physico-mathematical modeling of transducers with pneumomechanical resonator*
- 103** *Kharchenko V. S., Gridin Yu. V. The model of operation of spacecraft board computer systems with request categorization taking into account hardware and software faults*
- 110** *Khorkavtsiv O. Ya., Demkiv O. T. Gravitropic response in protonemata of the moss POHLIA NUTANS (HEDW.) Lindb. and its modulation by light*
- 118** *Didenko L. F., Parkhomenko N. I., Maksimenko L. A., Dyachenko N. S., Zaritskiy N. M., Kozar F. E. Influence of clinostating on the curly potato dwarf virus *in vitro* and *in vivo**

УДК 550.38

Проект **ВАРИАНТ:**  
вимірювання електромагнітних полів  
та електричних струмів в іоносферній плазмі  
на супутнику «Січ-1М»

В. Корепанов<sup>1</sup>, О. Негода<sup>2</sup>, Г. Лізунов<sup>3</sup>, Г. Аляйн<sup>4</sup>,  
М. Баліхін<sup>4</sup>, Я. Бленскі<sup>5</sup>, Ф. Дудкін<sup>1</sup>, А. Федоров<sup>6</sup>,  
Ю. Юхневич<sup>5</sup>, С. Клімов<sup>6</sup>, В. Красносельських<sup>7</sup>, Ф. Лефевр<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Львів

<sup>2</sup>Національне космічне агентство України, Київ

<sup>3</sup>Київський університет ім. Тараса Шевченка

<sup>4</sup>Sheffield University, Amy Johnson Building, Mappin Street, Sheffield, S1 3JD, United Kingdom

<sup>5</sup>Space Research Centre PAN, 18-A Bartycka str., 00716, Warsaw, Poland

<sup>6</sup>Інститут космічних досліджень РАН, Москва, Росія

<sup>7</sup>LPCE/CNRS, 3A Avenue de la Recherche Scientifique, 45071, Cedex 02, Orleans, France

*Надійшла до редакції 26.10.98*

ВАРИАНТ — це міжнародний супутниковий проект, що має на меті реєстрацію тонкої структури електричних струмів і електромагнітних полів в іоносферно-магнітосферній плазмі. Цей науковий експеримент буде проведено як додаткове навантаження на борту українського супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1М» (розробник та виготовник — КБ «Південне»), який планується у 2002 р. вивести на полярну кругову орбіту висотою  $670 \pm 30$  км та нахилом  $83^\circ$ . В комплект обладнання супутника входять три інструменти для реєстрації електричного струму в космічній плазмі: зонд Лентгіора, пояс Роговського та циліндр Фарадея. Перші два прилади спеціально призначенні для вимірювання густини електричного струму; циліндр Фарадея вимірює потік заряджених частинок. У склад комплексу також входять давачі електричного та магнітного полів, що працюють у діапазоні частот від 0.1 Гц до 40 кГц. З використанням цих інструментів планується провести порівняння та перевірку трьох можливих методик безпосередньої реєстрації струмів в іоносфері. Наступною метою проекту ВАРИАНТ є одночасне спостереження конвекції іоносферної плазми з борту супутника «Січ-1М» та з поверхні Землі (за даними системи радарів некогерентного розсіювання SuperDARN). Висвітлено основні наукові завдання проекту ВАРИАНТ.

## ВСТУП

Сонячна активність є основним чинником, що впливає на стан іоносфери. Спорадичні збурення

параметрів іоносферної плазми виникають як відгук на збурення параметрів сонячного вітру та магнітосфери. Проблема взаємодії сонячного вітру, магнітосфери та іоносфери є однією з головних

проблем фізики сонячно-земних зв'язків; її дослідженю присвячено цілий ряд міжнародних наукових програм, що передбачають проведення наземних магнітотермічних спостережень, зондування іоносфери, реєстрацію іоносферної та магнітосферної конвекції радарами некогерентного розсіювання SuperDARN та проведення прямих супутниковых спостережень. Кінцевою метою цих досліджень є моніторинг стану навколоземної плазми, достатньо повний для прогнозу параметрів іоносфери та магнітосфери.

Але прогноз іоносферних збурень є дуже складним завданням. Іоносфера — це відкрита система, яка тісно взаємодіє з магнітосферою. В цій взаємодії роль іоносфери не зводиться тільки до поглинання потоків корпукулярної та хвильової енергії, що надходять з магнітосфери, та замикання електричних струмів магнітосферної плазми. Між іоносферою та магнітосферою існують канали зворотного зв'язку, що робить всю систему нестабільною. Наприклад, електричні струми, що течуть в магнітосферній плазмі вздовж силових ліній магнітного поля, замикаються на висотах шару Е через поперечну провідність іоносферної плазми (педерсенівську та холлівську). При цьому будь-які варіації поперечної провідності (наприклад, зумовлені перерозподілом іоносферної плазми під дією атмосферних вітрів та іншими причинами) модифікують початкову структуру електричного струму та пов'язаний з ним глобальний розподіл електричного поля в магнітосфері.

Незважаючи на інтенсивне дослідження цих явищ у ряді супутниковых експериментів («Болгарія-1300», S33, «Geotail», FAST, «Interball» [1, 6–8, 11]), цілий ряд принципових питань залишається досі відкритим. Особливу цікавість викликає дослідження таких явищ:

- розподіл струмів на денній стороні авроральної іоносфери, оскільки конфігурація цих струмів значною мірою залежить від орієнтації міжпланетного магнітного поля,
- електродинамічні процеси у плазмі полярних каспів, сильно збурений впливом частинок та полів сонячного віtru,
- просторова структура іоносферної конвекції, що також залежить від орієнтації та величини міжпланетного магнітного поля,
- статистичні характеристики струмових структур.

Поряд із сонячною активністю, на стан іоносфери впливають і потоки енергії, що проникають в іоносферу «знизу» — від Землі. Велика кількість спостережень останніх років свідчить про те, що в стані іоносфери локально виявляються тропосферні

явища (грози, циклони, особливості циркуляції атмосфери), антропогенні фактори (пуски великих ракет, вибухи, робота потужних радіостанцій, ліній електропередач і т. д.), а також тектонічні процеси (землетруси, виверження вулканів, активні розломи, зони субдукції). В літературі широко обговорюється можливість використання іоносферних спостережень для прогнозу сейсмічної активності, а також для моніторингу природних та антропогенних катастроф.

Основна проблема, що перешкоджає експериментальному дослідженню впливів на іоносферу «знизу», пов'язана з порівняною слабкістю цих впливів; тільки в поодиноких випадках відповідні ефекти перевищують шуми, тобто збурення іоносфери іншої природи. Спостереження сейсмогенних ефектів в іоносфері проводяться за умови низької сонячної активності (звичайно при значеннях індексу Кр < 4). Замасковані шумами сейсмогенні ефекти в принципі можуть бути відновлені на підставі сучасних математичних методів розділення сигналів та шумів. Але для цього треба знати критерій розділення, тобто знайти структурні відмінності сейсмічних та геліофізичних збурень іоносфери. Такий підхід, очевидно, потребує великої кількості експериментальних даних та відповідного математичного моделювання.

Проект ВАРІАНТ має на меті прямі вимірювання розподілу електричного струму та електромагнітних полів в плазмі іоносфери; результати цих вимірювань будуть внесені до створюваної бази даних про сонячно-земні зв'язки.

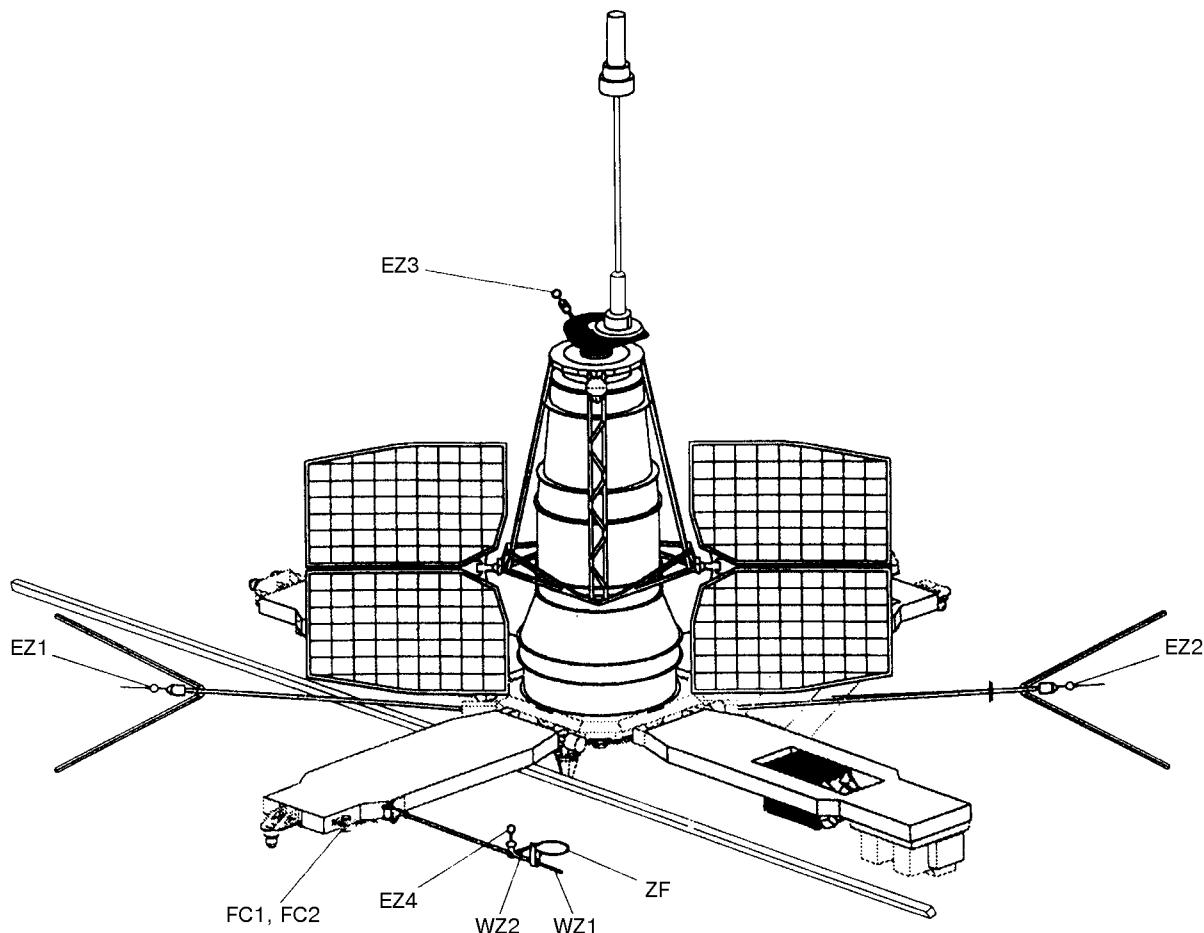
Другою метою проекту ВАРІАНТ є статистичне дослідження слабких проявів сейсмогенних ефектів у іоносфері та їхня селекція на тлі іоносферних збурень геліофізичної природи.

#### НАУКОВЕ ОБЛАДНАННЯ СУПУТНИКА

Як вже вказано, основною метою проекту ВАРІАНТ є дослідження реакції іоносфери на впливи «згори» (з магнітосфери та сонячного віtru) та «знизу» (з Землі). Для цього на борту українського супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1М» запропоновано встановити додатковий комплекс апаратури та провести серію електромагнітних експериментів. Запуск супутника заплановано на 2002 р.; час його активного функціонування — 1 рік; супутник буде виведено на колову полярну орбіту з висотою  $670 \pm 30$  км та нахилом  $83^\circ$ , яка перетне основні морфологічні структури іоносферної плазми: авроральний овал, середньоширотний провал, області полярних каспів

## Наукові інструменти проекту ВАРІАНТ

Інструменти	Вимірювані параметри	Установи, що відповідають за розробку та виготовлення
Хвильовий зонд WZ	Густота електричного струму $J$ : діапазон 0.1 Гц—40 кГц, чутливість $10^{-12} \text{ A/cm}^2 \text{Гц}^{1/2}$ Вектор магнітного поля $B$ : діапазон 0.1 Гц—40 кГц, чутливість $10^{-13} \text{ Тл}/\text{Гц}^{1/2}$ Електричний потенціал $\varphi$ : діапазон частот 0.1 Гц—40 кГц, чутливість $10^{-6} \text{ В}/\text{Гц}^{1/2}$	ЛІЦ ІКД НАНУ-НКАУ, Україна (В. С. Корепанов) СВК PAN, Польща (J. Juchniewicz), ІКИ РАН, Росія (С. І. Климов) LPCE/CNRS, Франція (V. Krasnoselskikh)
Пояс Роговського ZF	Густота електричного струму $J$ : діапазон 0.1 Гц—400 Гц, чутливість $10^{-12} \text{ A/cm}^2 \text{Гц}^{1/2}$	ЛІЦ ІКД НАНУ-НКАУ, Україна (В. С. Корепанов)
Електричний зонд EZ	Вектор електричного поля $E$ : діапазон 0.1 Гц—200 кГц, чутливість $10^{-6} \text{ В}/\text{Гц}^{1/2}$	LPCE/CNRS, Франція (V. Krasnoselskikh)
Циліндр Фарадея FC	Густота електричного струму $J$ : діапазон 0.1 Гц—1 кГц, чутливість $10^{-10} \text{ A/cm}^2 \text{Гц}^{1/2}$	ІКИ РАН, Росія (С. І. Климов) Sheffield University, Великобританія (H. Alleyne, M. Balikhin)



Розміщення давачів комплексу ВАРІАНТ на борту супутника «Січ-1М»: WZ — циліндричний зонд Ленгмюра; ZF — пояс Роговського; FC — циліндр Фарадея; EZ — електричний зонд

і т. д. Параметри та склад давачів комплексу ВАРІАНТ, встановлених на борту супутника «Січ - 1М», наведені в таблиці.

В програму експерименту ВАРІАНТ закладено ряд нових ідей. Перш за все, в корисне навантаження супутника введено одразу три незалежні

інструменти для вимірювання густини електричного струму, який розглядається як основний «агент» іоносферно-магнітосферного зв’язку [4, 5, 9, 10]. Одночасно з вимірюванням електричного струму будуть спостерігатися флюктуації електромагнітного поля, що дасть можливість розділити просторові та часові варіації вимірюваних параметрів. Ця можливість базується на ідеї [10] прямої реєстрації густини струму  $j(r)$  при перетині струмового шару супутником. Крім того, густина струму визначає  $\text{rot}B$ . Отже, якщо магнітне поле  $B$  реєструється одночасно і незалежно, то виникає можливість розрахувати розподіл хвильових векторів  $k$  і обчислити частоту хвилі  $\omega$  [5]. В експерименті ВАРІАНТ (рисунок) густина струму буде вимірюватись щілинним Ленгмюровським зондом (прилад WZ), поясом Роговського (ZF) та циліндром Фарадея (FC). Більш детально ці пристрої описані в роботі [3]. Якщо FC є широко відомим приладом, що часто використовується в космічних дослідженнях, то ZF буде запущено вперше, а хвильовий зонд WZ взагалі є новою унікальною розробкою. Цей прилад створено в результаті тісної співпраці ЛЦ ІКД НАНУ—НКАУ, ІКД РАН (Москва) та ЦКД ПАН (Варшава). Він дозволяє одночасно й незалежно вимірювати флюктуації густини просторового струму, магнітного поля та електричного потенціалу [2]. Електричні та магнітні поля будуть реєструватись електричними та магнітними сенсорами (прилади EZ та WZ) в діапазоні частот ELF/VLF. Інтерес саме до цього діапазону частот пов’язаний з тим, що ELF/VLF випромінення є характерним автографом різноманітних типів іоносферних збурень як геліофізичної, так і сейсмічної природи.

Як видно з таблиці, запропоноване корисне навантаження складається з чотирьох типів детекторів. Три з них будуть незалежно вимірювати густину електричного струму, що дасть унікальну можливість в космічному експерименті провести порівняльне дослідження трьох існуючих методів реєстрації іоносферних струмів.

#### НАУКОВА МЕТА ПРОЕКТУ ВАРІАНТ

Метою проекту ВАРІАНТ є вирішення наступних наукових завдань:

1. Дослідження глобального розподілу поздовжніх електричних струмів в полярній іоносфері, структури великомасштабних електричних полів та конвективних рухів іоносферної плазми.

2. Зіставлення супутникових спостережень з даними зондування іоносфери радарами системи SuperDARN.

3. Дослідження хвильових процесів у плазмі полярних каспів.

4. Реєстрація іоносферних явищ, зумовлених сейсмічною та вулканічною активністю; дослідження антропогенного впливу на іоносферу.

5. Дослідження взаємодії інфразвукових хвиль з іоносферною плазмою; комбіновані експерименти з наземним джерелом акустичних хвиль.

6. Активні експерименти над модифікацією параметрів іоносферної плазми потужним радіовипроміненням бортового радара.

Розглянемо ці завдання більш детально.

1. Дослідження глобального розподілу поздовжніх електричних струмів у полярній іоносфері, структури великомасштабних електричних полів та конвективних рухів іоносферної плазми. Як було вказано вище, комплексне дослідження високоширотної іоносфери дозволяє зрозуміти фізичні механізми переносу та дисипації енергії в системі «сонячний вітер —> магнітосфера —> іоносфера». Прискорені у хвості магнітосфери заряджені частинки висипаються в областях авроральних овалів, а частинки сонячного вітру безпосередньо досягають іоносфери через полярні каспи, викликаючи оптичні сяйва та додаткову іонізацію атмосфери. Завдяки високій поперечній провідності (холівській та педерсенівській), іоносфера замикає магнітосферні поздовжні струми, впливаючи на розподіл електричного потенціалу в магнітосфері. В результаті глобальний розподіл електричних струмів є залежним як від структури електричних та магнітних полів магнітосфери, так і від стану іоносфери (розподілу поперечної провідності, рухів нейтральної атмосфери). Експериментальне дослідження цих процесів потребує високоточного вимірювання струмів і електричних полів (конвекції) у високоширотній іоносфері (одна з головних цілей проекту ВАРІАНТ).

2. Зіставлення супутникових спостережень з даними зондування іоносфери радарами системи SuperDARN. Мережа радарів SuperDARN призначена для спостереження й дослідження магнітосферної конвекції в полярних районах методами некогерентного розсіювання. Система складається з шести радарів, які визначають дві складові швидкості плазмового дрейфу в шарах E та F. Спостереження провадяться в моніторинговому режимі; їхні дані згодом розповсюджуються на компакт-дисках. Група французьких фахівців з LPCE (Віллайн та Андре) проводить дослідження явища розмагнічування іонів і формування дрібномасштабних конвективних структур у вечірньому секторі магнітосфери. Вважається, що цей процес супроводжується генерацією поздовжніх електричних струмів. У

проекті ВАРІАНТ буде проведено скорельовані вимірювання струмів і конвективних рухів з борту супутника «Січ-1М» та радарами SuperDARN.

**3. Дослідження хвильових процесів у плазмі полярних каспів.** Наукове обладнання супутника «Січ-1М» дозволяє реєструвати низькочастотні типи плазмових хвиль: нижньогібридні, іонно-звукові, іонно-циклotronні, іонні моди Бернштейна і т. д. Такі хвилі характерні для областей, де полярні каспи проекуються на іоносферу.

Полярні каспи є ділянками прямого доступу частинок і полів сонячного вітру до внутрішньої магнітосфери та іоносфери. Теоретичні моделі передбачають складний характер руху плазми у каспі — генерацію вихорів, плазмових неоднорідностей та перезеднання магнітних силових ліній. В результаті виникають потужні поздовжні струми, плазмові філаменти та хвильові структури (на іонно-циклotronній частоті та її гармоніках), які спостерігались раніше з борту супутників VIKING, OGO-5 на менших висотах. Завданням проекту ВАРІАНТ є дослідження спектрального складу плазмової турбулентності в ділянках проекцій полярних каспів на іоносферу.

**4. Реєстрація іоносферних явищ, зумовлених сейсмічною та вулканічною активністю; дослідження антропогенного впливу на іоносферу.** Зміни параметрів верхньої атмосфери та іоносфери можуть свідчити про сейсмічні процеси в літосфері Землі. За кілька годин чи діб до землетрусу часто спостерігаються характерні свічення нічного неба, електромагнітні випромінювання в різних діапазонах частот, різноманітні плазмові явища, що свідчать про турбулізацію іоносфери. Природа цих явищ вивчена дуже мало; їхнє дослідження виводить на фундаментальні проблеми фізики іоносфери (наприклад, проблему енергетичного балансу іоносфери).

Генерація електромагнітних емісій є одним з основних виявів сейсмічного впливу на іоносферну плазму. Ці емісії спостерігались з борту іоносферних супутників, як правило, в VLF-діапазоні (свистові хвилі) та рідше — в ELF-діапазоні (альвенівські хвилі). Спостереження сейсмогенних електромагнітних емісій в іоносфері мали місце на супутниках «Інтеркосмос-19», OGO-6, NIMBUS, «Ореол-3», GEOS-1, GEOS-2, «Інтеркосмос—Болгарія-1300», DE-2 та «Інтеркосмос-24». Було встановлено, що специфічний VLF шум звичайно генерується на частотах кількох десятків кГц над епіцентром майбутнього землетрусу в ділянці розмірами близько 200—300 км в широтному напрямі і значно більш витягнутій у довготному напрямі. Радіовипромінення виникає за 10—20 годин до

початку землетрусу і продовжується приблизно стільки ж після нього, досягаючи максимуму в момент головного поштовху.

«Герцові» ELF-збурення магнітного поля спостерігались за кілька годин до землетрусу у вузькій магнітній трубці (40—100 км вздовж траєкторії космічного апарату), що спирається на епіцентр землетрусу. У випадку помірного землетрусу ( $M = 3.5—5$ ) амплітуда збурень магнітного поля складала 0.2—0.5 нТл на висотах 800—900 км на частоті 8 Гц. Експеримент ВАРІАНТ має на меті поповнення бази такого роду експериментальних даних.

**5. Дослідження взаємодії інфразвукових хвиль з іоносферною плазмою; комбіновані експерименти з наземним джерелом акустичних хвиль.** Фізичні механізми сейсмічного впливу на іоносферу, згадані в попередньому параграфі, на дійно не встановлені. Одна з гіпотез полягає в тому, що на іоносферу діють акусто-гравітаційні хвилі, які збуджуються в атмосфері сейсмічними коливаннями земної поверхні, що передують землетрусу. Оскільки характерні частоти сейсмічних хвиль лежать в діапазоні 0.01—1 Гц, в цьому випадку природно говорити про інфразвуковий канал сейсмо-іоносферного зв'язку. Вважається, що дисипація інфразвуку в іоносфері може спровокувати збудження іоносферної конвекції та помітно змінити енергетичний баланс іоносфери. Крім того, при перетині динамо-шару іоносфери (що розташований на висотах 80—150 км) інфразвукові хвилі безпосередньо трансформуються в альвенівські електромагнітні хвилі тієї ж частоти. Вірогідно, що останні і реєструвалися супутниками.

У розпорядженні ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ знаходяться потужні джерела акустичних хвиль. Попередні експерименти показують, що інфразвукове випромінення цих джерел може досягти іоносфери і спричинити генерацію ELF-випромінення, найбільш імовірно — альвенівських хвиль. Проект ВАРІАНТ створює зручну можливість для проведення активних експериментів з наземними акустичними джерелами і дослідження реакції іоносфери з борту супутника.

В рамках наземної підтримки експерименту ВАРІАНТ планується також організація вимірювань магнітного поля та його флуктуацій перш за все в сейсмоактивних зонах на території України — в Криму та Закарпатті. Особливу увагу буде приділено скоординованим спостереженням на борту супутника і на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». При наявності на станції розвиненої системи високочутливих приладів для реєстрації електричних та магнітних полів саме в

ELF—VLF-діапазоні та практичній відсутності індустріальних завад можна сподіватися на отримання нових даних щодо динаміки іоносфери у південних полярних широтах.

**6. Активні експерименти над модифікацією параметрів іоносферної плазми потужним радіовипроміненням бортового радара.** Супутникові спостереження плазмових резонансів, що їх збуджує робота бортового радара (в ряді експериментів — потужного телеметричного передавача), раніше давали можливість зареєструвати спектр плазмових хвиль тільки в системі відліку супутника. Це створювало неоднозначність в ідентифікації мовового складу емісії, що спостерігались. В проекті ВАРІАНТ плазмовий струм, вектори електричного та магнітного полів будуть реєструватись одночасно, що вперше дасть можливість чисто експериментальними методами (без використання теоретичних припущень) визначити хвильовий вектор та дисперсію хвиль у системі відліку «нерухомої» плазми при роботі потужного бортового радара, що входить до складу системи дистанційного зондування Землі супутника «Січ-1М».

## ВИСНОВОК

Національна космічна програма України передбає запуск великого космічного апарату типу АУОС під попередньою назвою «Січ-1М». Вперше у вітчизняній практиці космічних досліджень на борту супутника з додатковим навантаженням буде проведено науковий експеримент ВАРІАНТ, що розробляється у широкій міжнародній кооперації. Успішна реалізація експерименту сприятиме не тільки подальшому поступу у вивчені фундаментальних проблем космічної фізики, але й вперше у світі дозволить надійно визначити можливість проведення безпосередніх вимірювань одного з найважливіших носіїв інформації про електромагнітний стан плазми — густини просторового струму.

Робота виконується при підтримці контракту з НКАУ № 1189 та гранту INTAS 97-1769.

- Chmyrev V., Bilichenko S., Pokhotelov O., et al. Alfvén vortices and related phenomena in the ionosphere and magnetosphere // Phys. Scripta.—1988.—38.—P. 841.
- Korepanov V., Dudkin F., Berkman R. New technique for future wave experiments // Abstracts of «Magnetospheric research with advanced techniques», p. 19, China, Beijing (April, 1996).
- Korepanov V., Dudkin F. Comparative analysis of current density meters operating in space plasmas // Adv. Space Res.—1999.—23, N 8.—P. 1541—1544.

- Krasnosel'skikh V., Natanzon A., Reznikov A., et al. On the possibility of supporting the multi-satellite measurements of the cluster mission with single-satellite measurements in the Regatta-Cluster Project // Proc. of an International Workshop on «Space Plasma Physics Investigations by Cluster and Regatta» / Ed. by E. J. Rolf. — ESA SP-306, p. 79, Published by European Space Agency, (May, 1990)
- Krasnosel'skikh V., Natanzon A., Reznikov A., et al. Current measurements in space plasmas and the problem of separating between spatial and temporal variations in the field of a plane electromagnetic wave // Advances in Space Research.—1991.—11, N 9.—P. 37—40.
- Lysak R. L., Carlson C. W. The effect of microscopic turbulence on magnetosphere-ionosphere coupling // Geophys. Res. Lett.—1981.—8.—P. 269.
- Lysak R. L., Dum S. T. Dynamics of magnetosphere-ionosphere coupling including turbulent transport // J. Geophys. Res.—1983.—88.—P. 365.
- Titova V., Yurov E., Molchanov O., et al. Small scale structures of electric field variations and particle precipitations as observed onboard of Aureol-3 satellite // Proc. of «Results of the ARCAD-3 Project and of the Recent Programs in Magnetospheric and Ionospheric Physics»; p. 447, CEPADUES-EDITION, France (May, 1984).
- Vaisberg O. On the determination of the spatial scale in the moving reference frame // Sov. J. Space Res.—1985.—12, N 6.—P. 1241.
- Vaisberg O., Klimov S., Korepanov V. Current density measurements in the shock front by means of splitted Langmuir probe // Sov. J. Space Res.—1989.—27, N 3.—P. 512.
- Volokitin A., Krasnosel'skikh V., Mishin E., et al. // Sov. J. Space Res.—1984.—22.—P. 749.

## PROJECT VARIANT: MEASUREMENTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS AND CURRENTS IN THE IONOSPHERIC PLASMAS ABOARD THE SICH-1M SATELLITE

V. Korepanov, O. Negoda, G. Lizunov, H. Alleyne, M. Balikhin, J. Blecky, F. Dudkin, A. Fedorov, J. Juchniewich, S. Klimov, V. Krasnoselskikh, and F. Lefevre

VARIANT is a joint international space experiment on current density measurements in the ionosperic-magnetospheric plasmas. The experiment will be performed aboard the Ukrainian remote-sensing satellite Sich-1M which will be launched in 2002 into the polar circular orbit with an inclination of about 83° and altitude of  $670 \pm 30$  km. The scientific payload includes three instruments for the registration of space current density: split Langmuir probe, Rogovsky coil, and Faraday cup. The first two instruments are specially designed to measure the current density variations, the last one allows the measurements of particle fluxes. The equipment includes also the sensors for measurements of the electric and magnetic field fluctuations in the frequency range from 0.1 Hz to 40 kHz. These measurements are complementary of the current density ones and they will be used to make comparison between direct and implicit estimates of the distribution and fine structure of currents. The next goal of the VARIANT experiment is the observation of the fine structure of currents in space with the simultaneous ground-based measurement of the ionospheric convection in the E and F layers by the SuperDARN system of radars. The scientific objectives of the VARIANT mission are discussed.

УДК 553.911.98.

# К вопросу десифрирования космических снимков природных ландшафтов

А. Д. Федоровский

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 28.05.99*

Розглядаються методичні питання десифрування космічних знімків природних ландшафтів на основі ландшафтно-системного підходу і комплексного використання оптических спектральних і просторово-частотних інформативних ознак. Приводяться результати дослідження критеріїв оцінки та вибору космічних знімків для десифрування ландшафтних структур.

Космическое ландшафтоведение является одним из научных направлений, активно способствующих исследованию и решению различных природохозяйственных и природоохранных задач [15, 17]. Изучение и классификация природных ландшафтов (ПЛ) необходимы для проведения геофизического районирования территории, обоснования различных организационно-хозяйственных и технических мероприятий, связанных с землепользованием, сельским хозяйством, задачами лесного и водного хозяйства, городским и гидротехническим строительством. Несмотря на то, что за многие годы эксплуатации природоресурсных спутников Земли накоплен значительный опыт обработки космических снимков ПЛ, работы по совершенствованию методов десифрирования ПЛ продолжаются и в настоящее время. Исследуются различные информативные признаки ландшафтных структур, разрабатываются новые методы десифрирования, определяются критерии оценки космических изображений ПЛ и т. д. Цель данной работы заключается в рассмотрении некоторых из затронутых вопросов.

Известно, что для определения по космическим снимкам экологического состояния различных ПЛ в качестве информативных признаков широко используются спектры отражения и собственного излучения, коэффициент спектральной яркости и их производные [14, 19]. Однако использование оптических признаков и критериев в ограниченных

спектральных диапазонах не всегда дает положительные результаты. Это обусловлено тем, что перечисленные признаки не являются универсальными, а специфичны для конкретных ландшафтных структур, времени года, вегетационного периода и привязаны к географическому месту [11, 20].

В отличие от методов, использующих для исследования геоэкологических характеристик ПЛ в качестве информативных признаков непосредственно оптические спектральные параметры, существует принципиально иной подход — на основе ландшафтно-системного метода [2, 4]. Суть его заключается в анализе ландшафтного комплекса как сложной системы — природной среды в целом на разных уровнях абстрактного описания с учетом иерархии подсистем — ландшафтных структур, их приоритетов в природной системе и формировании обобщенного критерия классификации ПЛ.

При морфолого-генетическом принципе классификации ПЛ обладают всеми чертами, присущими иерархическим системам. Здесь понятиями более низкого таксонометрического ранга выступают: местности, уроцища, для уроцищ — фации, для фаций — парцеллы [21]. По совокупности признаков, которые уверенно десифрируются на аэрокосмических снимках, выделяются ландшафтные комплексы, которые классифицируются по типам. В свою очередь, тип ПЛ с достаточной степенью достоверности определяет основные геоэкологиче-

ские характеристики исследуемых регионов и на этой основе косвенными методами обнаруживаются те геоэкологические процессы и явления, которые не поддаются прямому дешифрированию [3, 4]. Для ландшафтных комплексов суши это уровень грунтовых вод, зоны интенсивного накопления загрязнений, участки возможного подтопления [23]. Для аквально-наземных ландшафтов (АНЛ) — гидрохимический и качественный состав водной среды, биопродуктивность, состояние нерестилищ, характеристики подстилающих грунтов и др. [7, 10]. Так, например, по космическим снимкам устьевых зон рек АНЛ можно оценить гидрографическую сеть, обнаружить и вычислить площади, занятые высшей водной растительностью, и определить гидрологический режим мест обитания растительных сообществ, в том числе площадь водного зеркала, интенсивность водообмена, характер береговой линии, тип мелководий, наличие пойменных водоемов, отмелей, рукавов и т. д. По совокупности перечисленных характеристик, полученных в результате дешифрирования космических изображений и заверенных наземными измерениями, производится классификация выделенных на снимке АНЛ по типам [8, 25].

Общеметодические положения системного подхода применимы для анализа большинства сложных систем, однако их реализация в каждом конкретном случае имеет свою специфику и требует формирования своих критериев и создания соответствующей процедуры принятия решения. Рассмотрим принцип применения ландшафтно-системного метода на примере классификации АНЛ по распределению на его площади водных растительных ассоциаций. Представим исследуемый АНЛ\* (например, участок устья реки) как природную систему  $A^*$  с совокупностью входящих в нее  $n$  подсистем нижнего уровня (ассоциации растений) в виде

$$A^* = [a_1(s_1)^*, a_2(s_2)^*, \dots, a_i(s_i)^*, \dots, a_n(s_n)^*], \quad (1)$$

где  $a_i(s_i)^*$  — вид подсистемы (ассоциации растений —  $a_i^*$ ) с ее текущим параметром  $s_i^*$  (площадь, занимаемая ассоциацией растений в системе  $A^*$ ).

Обозначим как  $A_j$ , содержащиеся в базе данных типы АНЛ<sub>j</sub>, где  $j = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  — общее количество АНЛ в базе данных.

Особенностью ПЛ является то, что в естественных условиях под действием различных факторов их структурный состав непрерывно изменяется, что приводит к переходу одного типа ПЛ в другой. В связи с этим точное совпадение параметров исследуемого в естественных условиях АНЛ\* с эталонными типами АНЛ<sub>j</sub> маловероятно. Переменное со-

стояние АНЛ\* учитывается путем установления в базе данных границ диапазонов параметров подсистем. В этом случае нижняя граница параметра  $s_i$ , подсистемы  $a_i — s_i(a_i, A_j)$  и верхняя граница —  $\bar{s}_i(a_i, A_j)$ . Для подсистем, отсутствующих в  $A_j$ , значения границ диапазона устанавливаются равными нулю. Для поиска оптимального решения (определения типа АНЛ<sub>j</sub>) целесообразно использовать метод теории нечетких множеств [12], который позволяет заменить точную принадлежность исследуемого участка к какому-либо типу АНЛ<sub>j</sub> на непрерывную функцию принадлежности, определяющую степень соответствия исследуемого АНЛ\* каждому типу АНЛ<sub>j</sub>. Отнесение АНЛ\* к конкретному типу производится по максимальному значению функции принадлежности.

При проведении классификации АНЛ\* задача решается в два этапа. На первом этапе определяется соответствие ассоциаций растений  $a_i(s_i)^*$ , прорастающих на исследуемом участке  $A^*$ , видовому составу ассоциаций растительности  $a_i(s_i)$  в базе данных для всех АНЛ<sub>j</sub>.

На основе теории нечетких множеств функция соответствия  $f(a_i^*, A_j)$  подсистемы  $a_i(s_i)^*$  для системы  $A_j$  определяется по формуле

$$f(a_i^*, A_j) = \rho_i(a_i, A_j)[\varphi(a_i^*, A_j) - \Delta S_j(a_i^*)/100]. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta S_j(a_i^*)$  — функция штрафа за несоответствие значения параметра  $s_i^*$  подсистемы  $a_i^*$  в системе  $A^*$  диапазону значений в базе данных соответствующего параметра  $s_i$  подсистемы  $a_i(s_i)$  в системе  $A_j$ :

$$\Delta S_j(a_i^*) = \begin{cases} \underline{s}(a_i, A_j) - s_i^* & \text{при } s_i^* < \underline{s}(a_i, A_j), \\ 0 & \text{при } \underline{s}(a_i, A_j) \leq s_i^* \leq \bar{s}(a_i, A_j), \\ s_i^* - \bar{s}(a_i, A_j) & \text{при } s_i^* > \bar{s}(a_i, A_j), \\ s_i^* & \text{при } \underline{s}(a_i, A_j) = \bar{s}(a_i, A_j) = 0, \end{cases}$$

$\varphi(a_i^*, A_j) = 1$ , если подсистема  $a_i(s_i)^*$  есть в  $A_j$ , и  $\varphi(a_i^*, A_j) = 0$  — в противном случае;  $\rho_i(a_i, A_j)$  — весовой коэффициент ассоциации  $a_i$  в  $A_j$ .

На втором этапе решается задача классификации исследуемого участка  $A^*$  (АНЛ\*) как задача многокритериальной оптимизации в пространстве  $n$  критериев [18], каждый из которых является функцией соответствия  $f(a_i^*, A_j)$  ассоциации  $a_i(s_i)^*$  каждому типу АНЛ<sub>j</sub>.

Решением исходной задачи многокритериальной оптимизации будет тип АНЛ<sub>j</sub>, для которого обобщенный критерий оптимальности или функция принадлежности  $f(A, A_j^*)$  достигает наибольшего значения:

$$f(A, A_j^*) = \sum_{i=1}^n \rho_i^* f(a_i^*, A_j) - \sum_{a_i(A) \notin A^*} \rho_i s(a_i, A_j) / 100, \quad (3)$$

где  $\rho_i^*$  — весовой коэффициент ассоциации  $a_i^*$  на участке  $A^*$  (АНЛ $^*$ ).

В формулах (2) и (3) весовые коэффициенты отражают приоритеты подсистем в зависимости от их роли в системе.

Первое слагаемое выражения (3) представляет собой характеристическую функцию принадлежности исследуемого участка  $A^*$  определенному типу АНЛ $_j$ . Когда распределение площадей, занятых ассоциациями  $a_i(s_i)^*$  на участке  $A^*$ , совпадает с распределением площадей соответствующих ассоциаций  $a_i(s_i)$  в  $A_j$ , то слагаемое  $\sum \rho_i^* f(a_i^*, A_j)$  равно единице. Чем больше различия в распределении площадей ассоциаций, тем меньше значение первого слагаемого в формуле (3). Если в  $A_j$  нет ни одной подсистемы  $a_i(s_i)^*$ , характеристическая функция  $\sum \rho_i^* f(a_i^*, A_j)$  равна нулю. Второе слагаемое выражения (3) является функцией штрафа за то, что в системе  $A_j$  есть подсистемы, не принадлежащие исследуемой системе  $A^*$ . Функция штрафа равна нулю, если  $A_j$  принадлежат только те подсистемы, которые есть в  $A^*$ , и увеличивается с увеличением количества и «веса» несовпадающих подсистем.

На основе изложенного метода в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины была разработана программа, по которой принятие решения о принадлежности того или иного участка к конкретному типу ландшафтного комплекса производится автоматически по максимальному значению функции принадлежности. Разработанная программа классификации ПЛ была апробирована при обработке результатов исследований экологического состояния Килийской дельты Дуная [7] и оценке качества воды в устьевых зонах рек Припять (Киевское водохранилище) [30] и Самара (Запорожское водохранилище) [16].

При ландшафтно-системном методе исследования изображений ПЛ важное значение приобретает распознавание структуры и текстуры элементов ПЛ. Уже в ранних работах по дешифрированию аэрокосмических изображений ПЛ наряду с оптическими спектральными признаками была показана значимость плановой структуры и текстуры изображений ПЛ [1, 4, 5]. В их числе размеры и форма контуров элементов ПЛ, ориентация и взаимное расположение в изображении, а также производные характеристики — пространственные спектры, гистограммы распределения, матрицы смежности и др. [27]. Существующие компьютерные методики об-

работки изображений используют различные способы улучшения их качества в надежде на то, что человек сможет увидеть пространственную мозаику, которую образуют природные объекты. Одними из наиболее информативных признаков пространственной структуры ПЛ являются пространственно-частотные спектры, которые позволяют уменьшить объем информации и в сжатой форме описать структурные особенности того или иного фрагмента изображения. Под пространственно-частотным анализом в данном случае понимается представление двухмерного распределения плотности фототона исследуемого фрагмента снимка в виде набора соответствующих пространственных гармоник, называемого пространственно — частотным спектром (ПЧС). Известно, что под пространственным гармоническим распределением яркости в теории построения изображений понимают распределение яркости в плоскости изображения по синусоидальному закону [6]. Пространственными частотами  $N_x$  и  $N_y$  являются величины, обратные периоду  $T_x$  и  $T_y$  пространственных гармоник ( $N_x = 1/T_x$ ,  $N_y = 1/T_y$ ). Переход от пространственного распределения плотности фототона к распределению по пространственным частотам осуществляется с помощью преобразований Фурье. При этом значения амплитуды гармонических составляющих определяют соответствующими коэффициентами Фурье-спектров.

Известны работы по исследованию ПЧС природных объектов, которые проводились на основе оптического когерентного спектрального анализа. Так, например, в работе [28] рассматривается структурно-зональный анализ (СЗА) как метод дешифрирования на космических снимках изображений геологических и других объектов. Идея СЗА состоит в преобразовании изображений и получении количественной оценки ПЧС по частотным и азимутальным зонам путем оптической фильтрации наиболее информативных признаков, характеризующих пространственную структуру изображения.

В настоящее время искусственные спутники Земли оснащены оптической сканирующей аппаратурой высокого разрешения, позволяющей получать изображения в цифровой форме. В связи с этим для выявления оптической пространственной структуры изображений различных ПЛ в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины вместо оптического когерентного спектрального анализа был применен чисто цифровой метод, позволяющий использовать широкие возможности современных ЭВМ. На основе последнего была разработана программа, с помощью которой на космическом снимке, отображаемом на дисплее, выделялся фрагмент размером  $A \times B$  пикселов и вычислялся его двухмерный пространственный

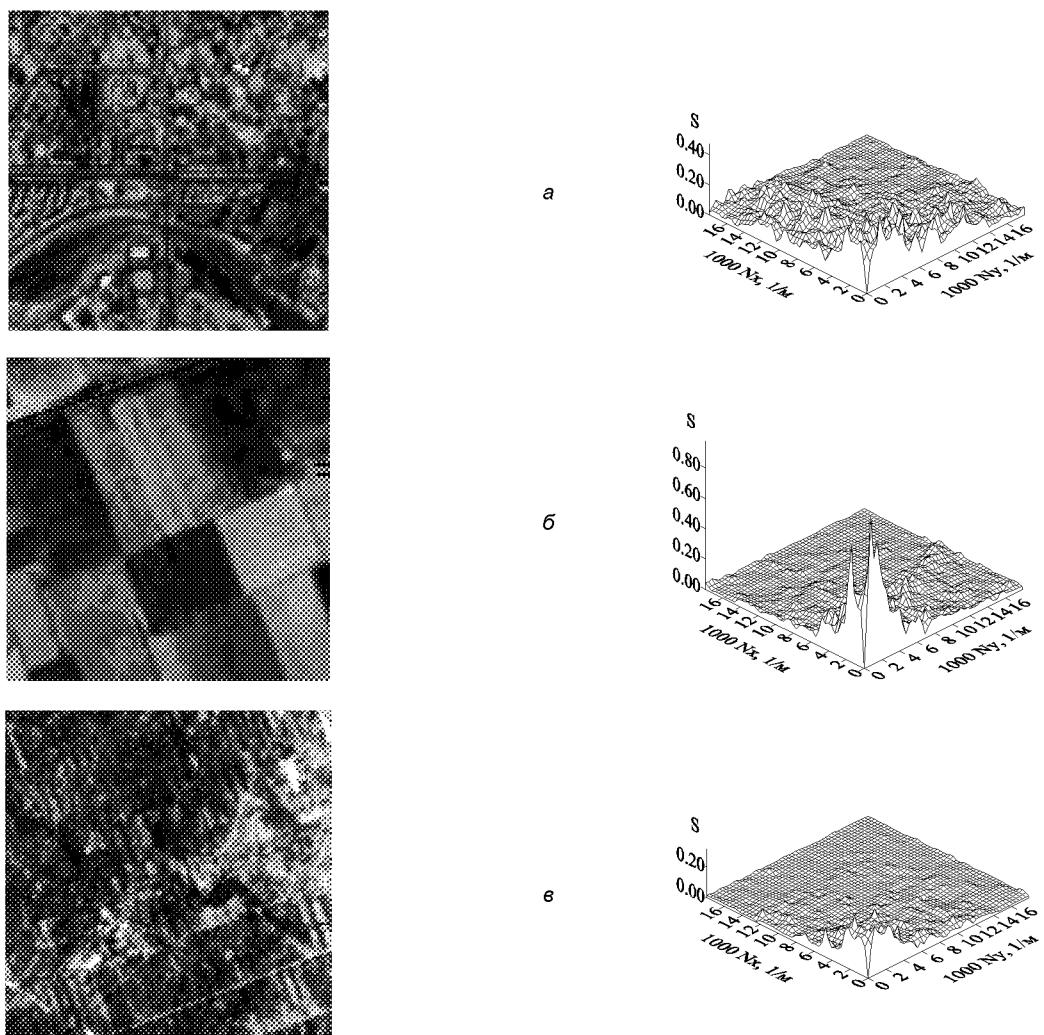


Рис. 1. Фрагменты космических снимков «Landsat» городской застройки (а), сельскохозяйственных полей (б) и участка леса (в) и их нормированные пространственные спектры

спектр Фурье. Программа позволяет задавать количество гармоник спектра, определять составляющие спектра, центрировать значения плотности фототона, а также выполнять другие операции с ПЧС. Для исключения влияния пространственной ориентации исследуемых фрагментов проводилось несколько циклов измерений и вычислений спектров по различным направлениям с последующим их усреднением и статистической оценкой вероятностных характеристик. Продолжением исследований является отбор информативных ПЧС признаков (отдельных спектральных диапазонов, их отношений и разностей) для последующего распознавания и классификация изображений ПЛ по типам.

На рис. 1 приведены фрагменты космических снимков «Landsat» городской застройки, сельскохо-

зяйственных полей, участка леса и их нормированные пространственные спектры. Сравнение приведенных на рис. 1 распределений амплитуд спектров по пространственным частотам для изображений различных ПЛ позволяет обнаружить различия в соответствующих диапазонах пространственного спектра. Как следует из сравнения спектров наибольшие отличия находятся в диапазоне высоких частот от  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  и выше. В изображении спектра сельскохозяйственного поля (б) можно распознать отображение прямолинейных структур снимка в виде участка, вытянутого в сторону высоких частот. Форма этого спектра характеризует плавное изменение яркости с преобладанием низких частот пространственного периода от 200 м и более. Для участка леса (в) характерна асимметрия, выраженная

ная в расширении спектра вдоль оси  $X$ , что вызвано, по-видимому, ориентацией просек в одном направлении. Спектр городской застройки ( $a$ ) содержит практически все частоты, соответствующие номинальному разрешению снимка (30 м) и размеру анализируемого участка.

Проведенные исследования показали реальную возможность использования ПЧС, особенно при частичной автоматизации процесса дешифрирования изображений ПЛ. Наиболее эффективны комплексные методы, позволяющие реализовать все доступные информационные характеристики, т. е. оптические спектральные признаки необходимо анализировать в совокупности с ПЧС признаками изображений зондируемых природных объектов [13, 22].

Распознавание ландшафтных структур во многом зависит от качества изображений, которое непосредственно связано с параметрами космических снимков. При дешифрировании последних должна обеспечиваться максимальная вероятность обнаружения морфологических признаков ландшафтных структур, совокупность которых позволит распознать элементы ландшафта, а затем с учетом наземных наблюдений определить тип ПЛ и оценить его геоэкологические параметры. Опыт дешифрирования изображений природных ландшафтов показывает, что не всегда лучший по разрешающей способности космический снимок является более информативным и обеспечивает высокую вероятность распознавания ландшафтных структур. В специальной литературе можно встретить выражения: «ландшафтное разрешение», «прозрачность», «рентгеноскопичность» снимков, а также уровень «генерализации» изображения [2, 4, 22]. Этими терминами подчеркивается то обстоятельство, что каждый масштабный уровень — мелкий ( $1 : 10^6$  и мельче), средний ( $1 : 2 \cdot 10^5$ ) и крупный ( $1 : 70—125 \cdot 10^3$ ) являются информативными для ландшафтных структур определенного уровня, отличающихся не только по морфологии, но и по генезису. Так, например, на мелкомасштабных космических снимках фиксируются общие генерализованные черты геологического строения, на среднемасштабных — расчлененность рельефа и гидографическая сеть, на крупномасштабных — элементы рельефа, растительность, параметры водных объектов и др. [2, 17, 22]. Это обстоятельство требует при выборе критерия оценки изображения в каждом конкретном случае учитывать не только физиономичные, но и генетические информативные признаки ландшафтных структур соответствующего уровня.

С целью исследования корреляционных связей значений различных критериев с вероятностью рас-

познавания изображений ландшафтных структур и оценки эффективности программ тематической обработки реальных космических снимков были поставлены эксперименты, которые проводились в два этапа. На первом этапе было проведено физическое моделирование [26]. С помощью сканирующей оптической аппаратуры получались изображения физических моделей, имитирующих ПЛ. Преимущество физического моделирования заключается в возможности изменять в процессе эксперимента параметры сканирующей оптической системы в широком диапазоне (световой диаметр, коэффициент усиления и разрешающую способность) и яркостные характеристики моделей. Это позволило получить значения вероятности распознавания изображений моделей от 0 до 1, что сложно было бы реализовать на основе только космических изображений. В результате установлено, что наибольшую корреляцию с вероятностью распознавания (0.84) и удовлетворительную отрицательную корреляцию с вероятностью ложного распознавания ландшафтных структур ( $-0.68$ ) имеет критерий  $\mu_L$ , являющийся по своей физической сути логарифмической формой отношения сигнал/шум в пространственно-частотной области спектра [31]:

$$\mu_L = \int \int_{G} \log_2 \left\{ 1 + \frac{S_{c.vx}(N_x, N_y) T^2(N_x, N_y)}{S_{w.vy}(N_x, N_y)} \right\} dN_x dN_y, \quad (4)$$

где  $S_{c.vx}(N_x, N_y)$  и  $S_{w.vy}(N_x, N_y)$  — пространственно-частотные энергетические спектры входного сигнала и шума на выходе аппаратуры соответственно;  $T(N_x, N_y)$  — результирующая функция передачи модуляции оптической сканирующей аппаратуры;  $N_x$  и  $N_y$  — пространственные частоты;  $G$  — область интегрирования в плоскости пространственных частот.

На втором этапе исследований производилось компьютерное моделирование процесса дешифрирования космических изображений. На основе реальных космических снимков участков рек: Днепр (спутник «Landsat»), Припять («Spot», «Landsat», «Ресурс») и Самара («Spot») создавались различного качества изображения устьевых зон рек, которые в последующем воспроизводились на мониторе компьютера. Моделирование космических изображений выполнялось с помощью программ «Photoshop», «Erdas Imagine» и специально разработанной программы. Путем изменения контраста, яркости и резкости, а также применения пространственно-частотной фильтрации было смоделировано 60 изображений устьевых участков рек различного качества. Для всех изображений были рассчитаны значения критерия  $\mu_L$ .

При расчете значения критерия по формуле (6) произведение  $S_{c.vx.}(N_x, N_y)T^2(N_x, N_y)$  определялось для каждого снимка путем измерения энергетического ПЧС изображения устьевого участка реки непосредственно по космическому снимку, что фактически соответствовало ПЧС изображения с шумом  $S_{(c.+ш.)вых.}(N_x, N_y)$ . Значение  $S_{ш.вых.}(N_x, N_y)$  определялось из допущения, что шум белый с нормальным распределением. В этом случае значение амплитуды спектра шума определялось по  $S_{(c.+ш.)вых.}(N_x, N_y)$  на пространственной частоте  $N_R$ , соответствующей реальной разрешающей способности космического снимка. Методика определения  $N_R$  изложена в работе [24].

На рис. 2 в качестве примера приведено семейство сечений нормированных ПЧС, полученных для разного качества космических изображений одного и того же участка устья реки Припять, а также соответствующих им нормированные значения критерия  $\mu_L$ . Видно, что с ухудшением качества космических изображений (уменьшение значений критерия  $\mu_L$ ) убывает высокочастотная область ПЧС изображений.

Дальнейший ход эксперимента заключался в дешифрировании полученных материалов группой из 12 операторов. Операторы, руководствуясь известными информативными признаками АНЛ, выставляли баллы (1–10) качества исследуемых изображений устьевых зон. Вероятностные оценки качества  $P$  для каждого изображения определялись как отношение суммы выставленных 12 операторами баллов к максимально возможной сумме 120 баллов.

Значения критерия  $\mu_L$  и вероятности  $P$  создают необходимые предпосылки для изучения корреляции между ними для всех исследованных изображений устьев рек Днепр, Припять и Самара. Значе-

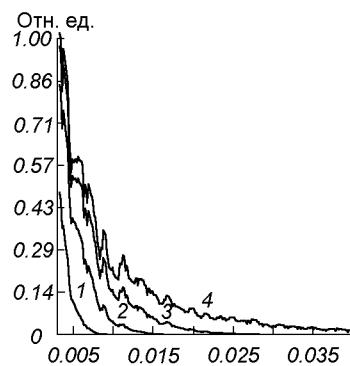


Рис. 2. Сечения нормированных ПЧС для разного качества космических изображений устьевой зоны реки Припять и соответствующие им нормированные значения критерия  $\mu_L$  (1 — 0.13; 2 — 0.26; 3 — 0.77; 4 — 1.0)

ние коэффициента корреляции  $r$  между  $\mu_L$  и  $P$  оказалось статистически значимым [9] и равным 0.87, что хорошо совпало с результатами физического моделирования (0.84).

Для оценки информативности разных оптических спектральных слоев космических снимков рассчитаны значения  $\mu_L$  для изображений устьевой зоны рек Самары и Припять в спектральных диапазонах 0.5—0.6; 0.6—0.7 и 0.7—0.8 мкм. Размеры анализируемых участков на местности для всех снимков выбирались равными, тем самым обеспечивался учет масштабов космических изображений. Результаты расчетов  $\mu_L$  показали, что наиболее информативным для распознавания АНЛ является спектральный диапазон 0.7—0.9 мкм, а самое большое значение  $\mu_L$  в этом спектральном диапазоне имеет снимок ИСЗ «Spot», что совпадает с данными, полученными на основе опыта многолетней практики дешифрирования [14, 29].

В процессе тематической обработки космических изображений участка устья Днепра была дана оценка эффективности программного продукта «Erdas Imagine». Процедура оценки заключалась в вычислении значений  $\mu_L$  для прошедших различную тематическую обработку космических изображений. Были получены нормированные значения  $\mu_L$ , характеризующие качество обработанных различными программами изображений: для исходного снимка — 1.0, после обработки программой «Luminance modification» — 1.4, «Speckle» — 0.6, «Wallis adaptive filter» — 1.54. Таким образом, наилучшие результаты дает обработка изображения по методике «Wallis adaptive filter», а методика «Speckle» значительно снизила качество исходного снимка. Результаты, полученные при визуальной оценке качества обработанных изображений, не противоречили оценкам, выполненным с помощью формализованной методики.

Ограниченный объем статьи не позволяет рассмотреть другие методы дешифрирования космических изображений ПЛ. В частности, не рассмотрены вопросы фильтрации как способа предварительного преобразования изображения с целью выделения или усиления информативности признаков, облегчающих последующее дешифрирование ПЛ. За рамками анализа осталось динамическое визуальное дешифрирование, которое предусматривает оперативное преобразование в интерактивном режиме космических изображений в реальном времени с помощью ЭВМ. Эти и другие вопросы планируется рассмотреть отдельно.

2. Востокова Е. А., Сущеня В. А., Шевченко Л. А. Экологическое картографирование на основе космической информации. — М.: Недра, 1988.—221 с.
3. Гейны С., Дубына Д. В., Сытник К. М. и др. Макрофиты — индикаторы изменений природной среды. — Киев: Наук. думка, 1993.—433 с.
4. Григорьев А. А. Космическая индикация ландшафтов Земли. — Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1975.—165 с.
5. Гродзинский М. Д. Основи ландшафтної екології. — Київ: Либідь, 1993.—220 с.
6. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику. — М.: Мир, 1970.—364 с.
7. Дьяченко Т. Н., Федоровский А. Д., Суханов К. Ю. К вопросу оценки экологического состояния Килийской дельты Дуная // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон черного моря: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1996.—С. 127—132.
8. Звенигородський Е. Л. Оцінка стану водних об'єктів з використанням експертної системи на базі нечіткої логіки // Укр. географ. журн.—1998.—№4 (24).—С. 34—37.
9. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973.—900 с.
10. Клоков В. М. Ценологическая характеристика водной растительности Килийской дельты Дуная // Высшие водные и прибрежноводные растения: Тез. докл. I Всесоюзн. конф., Борок, 1977, 7—9 сент. — С. 39—43.
11. Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В. Новое в дистанционном зондировании окружающей среды // Исслед. Земли из космоса.—1996.—№ 1.—С. 107—121.
12. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. — М.: Радио и связь, 1982.—432 с.
13. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во МГУ, 1995.—240 с.
14. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — Киев: Наук. думка, 1992.—206 с.
15. Лялько В. И., Маринич О. М., Федоровский О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // Укр. географ. журн.—1994.—№ 4.—С. 3—8.
16. Лялько В. И., Федоровский А. Д., Сиренко Л. Я., Рябоконенко О. Д. та ін. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів. — Ків: Додаток до журналу «Космічна наука і технологія».—1997.—3, № 3/4.—34 с.
17. Николаев В. И. Космическое ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.—81 с.
18. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982.—328 с.
19. Поздняков Д. В., Кондратьев К. Я. Дистанционное зондирование природных вод в видимом диапазоне спектра. I. Формирование яркости водной поверхности // Исслед. Земли из космоса.—1997.—№ 1.—С. 3—21.
20. Поздняков Д. В., Кондратьев К. Я. Дистанционное зондирование природных вод в видимом диапазоне спектра. II. Пути решения обратных задач // Исслед. Земли из космоса.—1997.—№ 2.—С. 3—24.
21. Преображенский В. С., Александрова Т. Д., Куприянова Т. П. Основы ландшафтного анализа. — М.: Наука, 1988.—189 с.
22. Ревzon А. Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве. — М: Транспорт, 1993.—272 с.
23. Федоровский А. Д., Гриневецкий В. Т., Костюченко Ю. В., Кувшинов А. Ю. Ландшафтоведческий подход при дешифрировании космических снимков // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 39—45.
24. Федоровский А. Д., Кононов В. И., Суханов К. Ю. Обоснование методики внешнего контроля оптической аппаратуры дистанционного зондирования земной поверхности // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3/4.—С. 50—53.
25. Федоровский А. Д., Сиренко Л. А., Звенигородский Э. Л. и др. Оценка экологического состояния водоемов с использованием космической информации // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 5/6.—С. 103—106.
26. Федоровский Ф. Д., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. К вопросу оценки космических снимков для дешифрирования природных ландшафтов // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 24—31.
27. Харалик Р. М. Статистический и структурный подход к описанию текстур. — М.: Мир, 1979.—67, №5.—С. 98—120.
28. Януш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М: Недра, 1991.—240 с.
29. Bukata R. P., Jerome J. H., Kondratyev K. Ya. et al. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton etc.: CRC Press.—1995.—365 p.
30. Fedorovsky A. D., Suhanov K. Yu., Yakimchuk V. G. The estimation of ecological condition of natural water systems with use of system approach / International Archives of Photogrammetry and Remote Sensung. Vol. XXXII, Part 7, Budapest, 1998.—P. 706—707.
31. Jones C. Information Capacity of Photographic Films // J. Opt. Soc. America.—1961.—51, N 11.—P. 1159—1171.

#### ON THE INTERPRETATION OF SPACE IMAGES OF NATURAL LANDSCAPES

A. D. Fedorovsky

Methodological problems of the interpretation of space images of natural landscapes on the basis of landscape system approach and complex use of optical spectral and space-frequency information attributes are considered. Criteria for evaluating and choosing space images for the interpretation of landscape structures are investigated.

УДК 621.372.542

Розвиток алгоритмів безвтратної компресії зображень на основі аналізу перепадів яскравості

Б. П. Русин<sup>1</sup>, В. Я. Мосоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Державний університет «Львівська політехніка»

*Надійшла до редакції 03.08.99*

Розглянуто алгоритми безвтратного стиску зображень в сучасних системах передачі даних для підвищення ефективності використання каналів із недостатньою перепускною здатністю. Запропоновано новий підхід до безвтратного стиску, при якому декореляція зображення здійснюється аналізом значень перепадів яскравості, кодуванням старших розрядів сусідніх пікселів та інтерполяцією значень без використання ієрархічної декомпозиції зображень. Приведено порівняльний аналіз запропонованих алгоритмів з відомими ієрархічними алгоритмами безвтратного стиску.

Півтонові космічні зображення земної поверхні, які формуються за допомогою сканерів, широко використовуються при складанні карт, розвідці корисних копалин, для військових цілей тощо [2]. Їхня передача із супутників здійснюється цифровими каналами і вимагає узгодження перепускної здатності каналів з об'ємами інформації [3]. Найпростіше цього можна досягнути розробкою відповідних методів та алгоритмів стиску об'ємів інформації, принаймні витрати на неї значно нижчі, ніж витрати на модернізацію каналів.

Цифрові зображення представляються матрицею  $[B(i, j)]$ ,  $(i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M)$ , де  $i, j$  — номери стовпчика і рядка, а  $B(i, j)$  — значення яскравості у точці з координатами  $i, j$ . Якщо після операції стиску відновлене зображення  $[B_{\text{out}}(i, j)]$  еквівалентне оригіналу  $[B_{\text{in}}(i, j)]$ , тобто похибка

$$\delta = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (B_{\text{in}}(i, j) - B_{\text{out}}(i, j))^2 = 0,$$

то такий стиск має назву безвтратної компресії.

Використання безвтратної компресії обумовлене тим, що наявні на зображені оригіналу потенційно важливі невеликі деталі, а також перепади яскравостей, підлягають певній деформації при компресії

з втратами. Слід також врахувати, що стиск може здійснюватись перед фільтрацією, оскільки прийняття рішення при вибір методу усунення завад здійснюється вже на приймальній стороні.

Безвтратну компресію виконують двома послідовними процедурами: декореляцією та кодуванням. Результатом першої є декорельоване зображення, яке при однакових розмірах має меншу ентропію через усунення з нього просторової надлишковості. Власне сам стиск відбувається на другому кроці з застосуванням добре відомих методів нерівномірного кодування: методу Хаффмена [5], арифметичного кодування [4], кодування за допомогою різноманітних модифікацій алгоритму Лемпела—Зіва.

Основна увага спеціалістів, що займаються алгоритмами безвтратної компресії, звернена саме на проблему декореляції оригінальних зображень, оскільки алгоритми нерівномірного кодування достатньо розроблені.

Декорельоване зображення — це набір випадкових значень з законом розподілу, близьким до симетрично-експоненційного, та нульовим математичним сподіванням. Значення дисперсії такого закону повинно бути меншим, оскільки ентропія

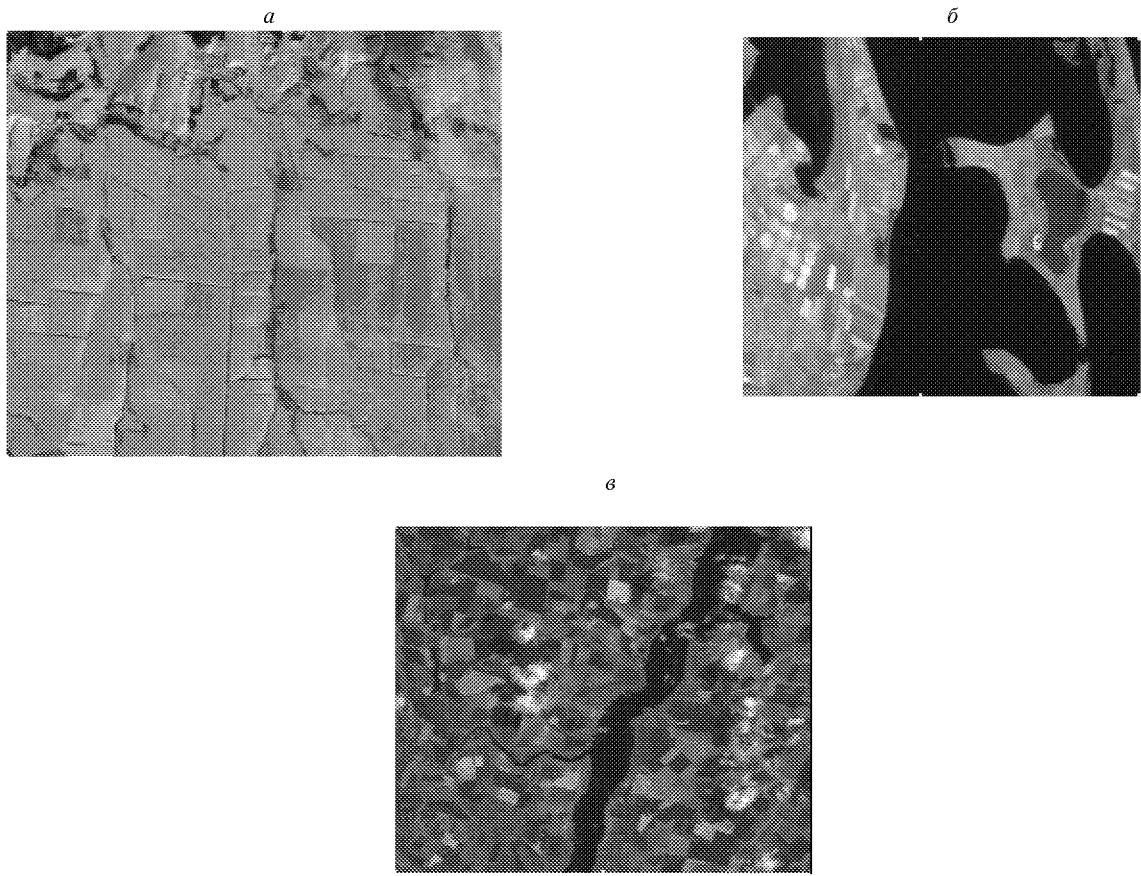


Рис. 1. Приклади зображень поверхні Землі, отримані з супутників: *a* — поле, *б* — коса, *в* — річка

також зменшується, що зменшує середню довжину коду на один піксель зображення.

У відомих алгоритмах декореляції, таких як алгоритми інтерполяції [6], класифікації і багаторівневої декомпозиції [7] та передбачуючого кодування [1], виконується процедура розбиття оригіналу  $[B(i, j)]$  на субзображення  $[B_q(i_q, j_q)]$  (декомпозиція), формування елементів яких здійснюється на ієрархічній основі. При цьому

$$[B(i, j)] = \bigcup_{q=1}^Q [B_q(i_q, j_q)], \quad q \in Q, \quad (i_q, j_q) \in D_q,$$

де  $D_q$  — множина точок субзображення  $q$ -рівня ієрархії ( $D_q \cap D_p = \emptyset$ ,  $q \neq p$ ,  $Q$  — кількість рівнів ієрархії).

Елементи субзображення вищих рівнів  $B_q(i_q, j_q)$  визначаються з елементів субзображення нижчих рівнів  $B_k(i_k, j_k)$ ,  $k = 1, \dots, q - 1$  за допомогою інтерполяційних поліномів  $f_q$ .

В загальному випадку запишемо

$$[B_q(i_q, j_q)] = f_q([B_{q-1}(i_{q-1}, j_{q-1})]),$$

Різниці між значеннями в точках зображення оригіналу  $[B(i, j)]$  та  $[B_q(i_q, j_q)]$ , є елементами декорельованого зображення  $[B_d(i, j)]$ ,

$$[B_d(i, j)] = [B(i, j)] - \bigcup_{q=1}^Q [B_q(i_q, j_q)], \quad q \in Q. \quad (1)$$

Подібним чином здійснюється формування субзображення  $B_q(i_q, j_q)$  і в інших алгоритмах. Відмінність полягає лише у виборі розміщення множин точок  $D_q$ , та виразів інтерполяційних поліномів  $f_q$  для визначення значень пікселів субзображень вищих рівнів ієрархії через нижчі.

В деяких алгоритмах можливий вибір конкретного полінома  $f_q$  із заданого набору  $S_q$  поліномів для  $q$ -го рівня ієрархії —  $\{f_q^s\}$ ,  $s \in S_q$ . Даний вибір, наприклад, може здійснюватися за напрямом градієнта в околі точок  $i_q, j_q$  та вибором типу полінома за його мінімальною зміною. Це, у свою чергу, приводить до зменшення значень в (1). Очевидно, що використання одного із типів поліномів дозволяє змінювати ентропію декорельованого зображен-

ня та параметри стиску.

Відзначимо недоліки, які характерні для ієрархічних алгоритмів.

При розбитті зображення оригіналу на окремі субзображення, значення різниць в (1), визначені для елементів нижчих рівнів субзображення, особливо нульового, значно більші, ніж для субзображеннявищих рівнів. Як наслідок, на сумарну ентропію декорельованого зображення особливо впливають ентропії субзображення нижчих рівнів.

Іншим важливим недоліком є неврахування того, що найвища кореляція — між *двома* сусідніми пікселями, а у ієрархічних алгоритмах значення елементів субзображення визначаються за декількома сусідніми елементами по вертикалі чи горизонталі.

Запропонований алгоритм не вимагає розбиття оригіналу на субзображення, усуваючи тим самим значний вплив на величину стиску субзображення нижчих рівнів. Одночасно для зменшення значень різниці (1) він враховує неодинаковість значень перепадів яскравості між сусідніми елементами у різних напрямках.

У запропонованому алгоритмі для елементів кожного рядка визначаються значення кореляційних коефіцієнтів по горизонталі — між сусідніми пікселями та вертикалі — між пікселями даного і попереднього рядка, — відповідно  $R_h$  та  $R_v$ . Вони дозволяють встановити, в якому напрямку взаємозв'язок є вищим, а розрив яскравості меншим. Якщо  $R_v < R_h$ , то декореляція даного рядка здійснюється диференціальною імпульсно-кодовою модуляцією (ДІКМ) по горизонталі (ДІКМ-Г). Якщо ж  $R_v > R_h$  — між елементами по вертикалі (ДІКМ-В). Значення коефіцієнтів  $R_v$ ,  $R_h$  визначаються як середні значення перепадів яскравості між елементами одного рядка та елементами двох сусідніх рядків:

$$R_h = \frac{1}{MN} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^M |B(i, j) - B(i - 1, j)|,$$

$$R_v = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^M |B(i, j) - B(i, j - 1)|.$$

Декореляція першого рядка  $[B(i, 1)]$ , а також першого стовпця  $[B(1, j)]$  здійснюється шляхом ДІКМ-Г та ДІКМ-В відповідно.

Для ілюстрації цих тверджень були виконані експериментальні дослідження зображень розмірністю  $240 \times 240$  та  $512 \times 512$  пікселів, отриманих з ШСЗ (рис. 1).

Ентропії та значення яскравості даних зображень представлені у табл. 1. Очевидно, що не розкид значень яскравості в зображені впливає на зна-

Таблиця 1. Параметри досліджуваних зображень поверхні Землі

Назви зображень	Кількість значень яскравості	Ентропія
Поле	233	6.49
Коса	138	5.51
Річка	108	5.40

Таблиця 2. Ентропії декорельзованих зображень по вертикалі та горизонталі

Назви зображень	Ентропія	
	ДІКМ по горизонталі	ДІКМ по вертикалі
Поле	4.64	4.51
Коса	4.50	3.98
Річка	4.21	4.22

чення ентропії, а саме частота їх появи, що також ілюструється даною таблицею.

До кожного з цих зображень застосувалась як ДІКМ-Г, так і ДІКМ-В. Для декорельзованих зображень отримані значення ентропій представлено у табл. 2. Видно, що вибір напряму (по вертикалі чи горизонталі) особливо для зображення коси, відіграє важливу роль, оскільки різниця ентропій становить 0.52 біта. Це легко пояснити, оскільки дане зображення містить крупні темні області, орієнтовані вертикально. При їх горизонтальній орієнтації результати були б протилежними. На рис. 2 наведені декорельзовані зображення коси по вертикалі та горизонталі. Добре видно більшу рельєфність зображення по горизонталі, ніж по вертикалі.

Для задання відновлюючому алгоритму інформації про ДІКМ формується додатковий масив, розмір якого дорівнює  $N/8$  біт. Кожен окремий біт визначає, який саме тип застосовувався, — ДІКМ-Г чи ДІКМ-В. Додатково введені біти не впливають на величину ентропії, оскільки розмір декорельзованого зображення збільшується при цьому лише на  $100/(8M)$  %.

До переваг даного алгоритму можна віднести те, що при визначенні значень елементів декорельзованого зображення враховується величина перепадів яскравості: якщо вона вища по вертикалі, то вибирається горизонтальний напрямок і навпаки.

Іншим додатковим фактором, який можна використати для зменшення ентропії і таким чином покращити параметри стиску, є усунення корельованості старших бітів сусідніх пікселів. Очевидно, що даний біт не змінює свого значення на протилежне від одного пікселя до іншого, а є деякою сталою величиною на певних відрізках. Це дозволяє здійснити переход від задання абсолютноного

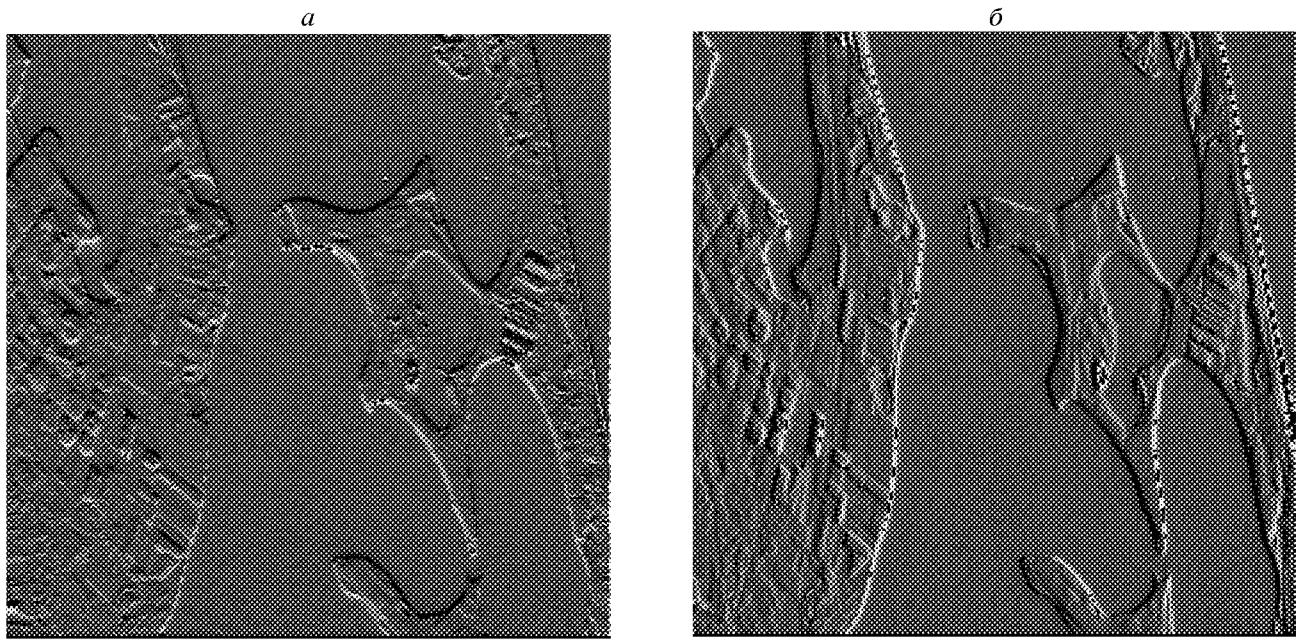


Рис. 2. Декорельовані зображення коси, отримані за допомогою: а — ДІКМ-В, б — ДІКМ-Г

значення до відносного його кодування. Наприклад, зміна старшого біта вказує на необхідність змінити його значення на протилежне. Це дозволяє перейти від симетричного експоненційного закону розподілу значень для (1) до різко асиметричного розподілу, що зменшує розкид значень та ентропію декорельованого зображення.

Інформацію про використання конкретної ДІКМ, яка міститься у N/8 бітах додаткового масиву, можна використати для досягнення ще вищої декореляції. Коли після двох послідовних ДІКМ-В наступною є горизонтальна, попередній рядок можна сформувати на основі використання інтерполяційних поліномів, як і у ієархічних алгоритмах, оскільки значення попередніх рядків вже відомі, а значення наступних рядків можна відновити без участі даного рядка.

Наприклад, якщо рядок  $i - 1$  визначався через ДІКМ-В, а два наступні рядки  $i$  та  $i + 1$  — через ДІКМ-Г, то  $i$ -й рядок визначаємо через значення

рядків  $i - 1$  та  $i + 1$  за обраним інтерполяційним поліномом.

У табл. 3 наведені результати стиску даних зображень за відомими алгоритмами: алгоритм інтерполяції (АІ), алгоритм багаторівневої декомпозиції (АБРД), алгоритм передбачуючого кодування (АПК). Стиск декорельзованих зображень здійснюється за алгоритмом Хаффмена.

Відзначимо використані параметри для згаданих вище алгоритмів: у випадку АІ — трирівневий алгоритм; у випадку АБРД — дворівнева декомпозиція з розбиттям на чотири субзображення; у випадку АПК — розбиття зображення на два субзображення, одне з яких формується почергово рядками з парними та непарними пікселями оригінального зображення, а інше визначається на основі першого шляхом аналізу локальних градієнтів.

В табл. 4 представлено результати почергового використання трьох запропонованих алгоритмів для

Таблиця 3. Порівняльні результати стиску зображень для відомих алгоритмів

Назви зображень	Інтерполяції		Багаторівневої декомпозиції		Передбачуючого кодування	
	ентропія	стиск	ентропія	стиск	ентропія	стиск
Поле	4.47	1.779	4.41	1.78	4.46	1.78
Коса	4.23	1.857	4.06	1.93	4.16	1.88
Річка	4.31	1.798	4.196	1.98	4.02	1.97

Таблиця 4. Результати дослідження запропонованих алгоритмів

Назви зображень	З врахуванням орієнтації перепадів	З відносним кодуванням	З додатковим врахуванням просторового розподілу	Стиск
	ентропія	ентропія	ентропія	
Поле	4.41	4.39	4.36	1.78
Коса	3.97	3.93	3.92	1.99
Річка	4.02	3.98	3.98	1.97

декореляції зображень рис. 2. Стиск зображень, як і у попередньому випадку, здійснювався за алгоритмом Хаффмена.

Порівняння табл. 3 і 4 показує, що запропонований підхід ефективніший, ніж відомі алгоритми, особливо коли значення перепадів яскравості переважають в одному напрямі (зображення коси — напрям вздовж горизонталей). Застосування відносного кодування (графа 3, табл. 4) і просторового розподілу (графа 4, табл. 4) також дозволяє зменшити ентропію приблизно на 2 %.

**Висновок.** Використання запропонованого підходу дозволяє отримати менші значення ентропії і вищий коефіцієнт стиску у порівнянні з відомими методами. Розроблені алгоритми слабо залежать від величини ентропії вхідного зображення, а їх ефективність зменшується при нижчій корельованості сусідніх пікселів зображення (зображення поля).

1. Мосоров В. Я. Ієрархічний алгоритм компресії графічної інформації // Комп'ютерні технології друкарства: Збірник наук. праць 2-ї міжнар. конф. — Львів, 1998.—С. 47—48.
2. Русин Б. П. Системи синтезу, обробки і розпізнавання складноструктурзованих зображень. — Львів: Вертикаль.—1997.—264 с.
3. Русин Б. П., Мосоров В. Я. Розвиток алгоритмів безвтратного стиску зображень для сучасних систем передачі інформації // НТК-Телеком-99: Тр. IV Междунар. научно-

техн. конф. по телекоммуникаціям. — 1999.—С. 607—610.

4. Howard P., Vitter J. New methods for lossless image compression using arithmetic coding // J. Info. Proc@Manag.—1992.—28, N 5.—P. 765—779.
5. Huffman D. A. A method for the construction of minimum-redundancy codes // Proc. IRE.—1952.—40.—P. 1098—1101.
6. Jain A. K. Image data compression: A review // Proc IEEE.—1981.—69.—P. 349—389.
7. Lee H. S., Kim Y., Oh S. Lossless compression of medical images by predication and classification // Opt. Eng.—1994.—33.—P. 160—166.

---

#### DEVELOPMENT OF LOSSLESS IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS BASED ON THE ANALYSIS OF BRIGHTNESS DIFFERENCES

B. P. Rusyn and V. Ya. Mosorov

We discuss the lossless image compression algorithms which are used in the modern data base communication systems for upgrading the efficiency of the channels with insufficient transmitting capacity. A new approach is proposed for lossless compression in which the image decorrelation is based on the analysis of brightness differences, coding of most significant digits in neighboring pixels, and interpolation, without recourse to the hierarchical image decomposition. These algorithms were compared with well-known hierarchical algorithms for lossless compression.

УДК 621.396.946+517.97

## К выбору мощности бортового передатчика космических станций для цифровых систем спутниковой связи

Е. Е. Александров, О. Я. Рафалович

Харківський державний політехнічний університет, Харків

*Надійшла до редакції 30.03.99*

Розглянуто проблему побудови ефективних конфігурацій систем супутникового зв'язку. Наведено приклад аналізу цифрової системи супутникового зв'язку для регіону Воронеж—Харків—Волгоград—Ростов-на-Дону. На основі запропонованого критерію якості знайдено оптимальне значення потужності бортового передавача для розглядуваної системи. За допомогою розроблених алгоритмів та програмного забезпечення створено атлас регіональних карт ймовірності помилки для різних конфігурацій систем супутникового зв'язку.

Одним из основных направлений развития экономичных систем спутниковой связи (ССС) является совершенствование энергетической подсистемы космических станций (КС) [2, 3, 9, 12–14]. Улучшение показателей этой подсистемы не только позволяет создавать более экономичные системы связи, но также является основой ряда новых служб, например персональной связи и передачи высококачественных телевизионных программ. Для реализации таких служб требуется значительно повысить плотность потока энергии. Среди наиболее перспективных в области спутниковой энергетики можно отметить: а) концентраторы солнечной энергии; б) высококачественные солнечные элементы (на основе арсенида галлия); в) КС (спутники), в которых связное оборудование и подсистема корректировки орбиты питаются только от аккумуляторов с улучшенными характеристиками или от водородно-кислородных топливных элементов; г) ионные двигатели, которые полностью обеспечивают электроэнергией все бортовые устройства и

системы корректировки орбиты и т. д. Однако проектирование и эксплуатация ССС требуют разработки не только отдельных элементов, но и синтеза оптимальных конфигураций ССС [2, 3].

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что задача выбора оптимального значения мощности бортового передатчика КС ССС важна и актуальна. Одним из основных показателей ССС является качество передаваемой информации. Поэтому в качестве одного из возможных критериев оценки эффективности цифровой ССС необходимого для выбора оптимального значения мощности бортового передатчика КС может использоваться следующий [3, 7]:

$$U = Q^\nu / P^\delta,$$

где  $Q$  — показатель общественной полезности ССС;  $P$  — мощность бортового передатчика КС;  $\nu$  и  $\delta$  отражают вес (значение) соответствующих факторов. Показатель общественной полезности системы связи  $Q$  можно, в свою очередь, представить в виде

$$Q = Q(x, y) = W(x, y)\sigma(x, y),$$

где  $W(x, y) = 1/P_{\text{ош}}(x, y)$ ;  $P_{\text{ош}}(x, y)$  — вероятность ошибки при передаче одного бинарного символа в точку региона  $(x, y)$  в условиях множественных помех;  $\sigma(x, y)$  — плотность распределения потребителей информации в точке региона с координатами  $(x, y)$ .

Рассмотрим цифровые ССС с фазовой модуляцией на геостационарной орбите (ГО), получившие широкое распространение в спутниковой связи [2, 3, 6, 8—11], и оценим величину вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}(x, y)$ .

Полезный сигнал, передаваемый КС, имеет вид

$$v_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT) \cos [\omega_c t + a_k \theta(t - kT)],$$

где  $p(t)$  — амплитудная модулирующая функция,  $T$  — тактовый интервал,  $\omega_c$  — круговая частота полезного сигнала,  $f_c = \omega_c/2\pi$  — частота полезного сигнала,  $a_k$  —  $k$ -й фазовый символ,  $\theta(t)$  — фазовая модулирующая функция. Для М-ричной системы символ  $a_k$  обычно выбирается из множества

$$a_k \in \left\{ \frac{2\pi n}{M} \right\}, \quad n = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

$i$ -й мешающий сигнал можно представить в виде

$$v_i(t) = R_i(t) \cos [\omega_i t + \psi_i(t) + \mu_i], \quad i = 2, 3, \dots, N,$$

где  $R_i$  — огибающая сигнала,  $\omega_i$  — круговая частота,  $\psi_i(t)$  — фазовая функция,  $\mu_i$  — фаза  $i$ -го мешающего сигнала, которая считается не зависящей от фазы других сигналов и функций, и равномерно распределенной на интервале  $(0, 2\pi)$ .

Цифровые мешающие сигналы имеют вид:

$$\begin{aligned} v_i(t) = & \sum_{k_i=-\infty}^{\infty} r_i p_i(t - k_i T_i - \tau_i) \cos [\omega_i t + \\ & + a_{ik_i} k_i \psi_i(t - k_i T_i - \tau_i) + \mu_i], \end{aligned}$$

где  $r_i$  — относительный уровень помехи,  $T_i$  — длительность символа,  $\tau_i$  — смещение сигнала во времени (сдвиг символа),  $a_{ik_i}$  — коэффициент, который принадлежит множеству, аналогичному множеству (1), но не обязательно с ним совпадающему.

Каждый сигнал проходит через фильтр с эквивалентной низкочастотной функцией передачи  $H_i(f)$  и соответствующим импульсным откликом  $h_i(t)$ . Поскольку все сигналы должны проходить через один и тот же приемник, характеризуемый функцией  $H_{\text{пр}}(f)$  [или  $h_{\text{пр}}(t)$ ], эта передаточная функция

является общей для всех  $H_i(f)$ . Предположим, что имеется идеальный фазовый приемник, который осуществляет посимвольную выборку мгновенных фаз  $\beta$  и принимает решение, что значение индекса фазовой модуляции  $a_k = 2\pi n/M$ , если

$$(2n - 1)\pi/M \leq \beta \leq (2n + 1)\pi/M.$$

Определив комплексные огибающие как

$$e_i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT) \exp [ja_k \theta(t - kT)],$$

$$e_i(t) = R_i(t) \exp \{j[\omega'_i t + \psi_i(t) + \mu_i]\}, \quad i = 2, \dots, N,$$

где  $\omega'_i = \omega_i - \omega_c$ , получим выражение для комплексной огибающей на входе фазового детектора:

$$e(t) = n_c(t) + j n_s(t) + \sum_{i=1}^N e_i(t) \cdot h_i(t),$$

где  $n_c(t)$  и  $n_s(t)$  — синфазная и квадратурная составляющие шума на выходе фильтра приемника.

Предположим, что детектируется нулевой символ  $a_0$ , для которого выборка происходит в момент  $t = t_0$ . Оценка фазы, по которой принимается решение, равна

$$\beta_0 \equiv \beta(t_0) = \arctg \frac{e_s(t_0)}{e_c(t_0)},$$

где  $e_c(t_0)$  и  $e_s(t_0)$  — соответственно действительная и мнимая части огибающей  $e(t)$ :

$$\begin{aligned} e_c(t_0) &= s_{c0} + n_{c0} + x_{c0} + y_{c0}, \\ e_s(t_0) &= s_{s0} + n_{s0} + x_{s0} + y_{s0}, \end{aligned}$$

где  $s$  — составляющая сигнала,  $x$  — составляющая межсимвольных помех,  $y$  — составляющая помехи.

Используя модель ССС [1, 4, 10, 11] для вероятности  $P_{\text{ош}}(x, y)$  ошибки при передаче одного бинарного символа в условиях множественных помех получим следующее выражение:

$$P_{\text{ош}}(x, y) = E[\text{erfc}(\rho(x, y) \sin(\pi/M) + \rho(x, y) Z(x, y))],$$

где  $E[\cdot]$  — символ безусловного математического ожидания,  $\text{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$  — дополнительная функция ошибок,  $M$  — число положений фаз при фазовой модуляции,  $\rho^2 =$  отношение сигнал/шум по мощности,  $Z = \sum_{j=1}^K R'_j \cos \varphi_j$  — случайная величина, описывающая влияние помехи, связанной с соседними КС,  $K$  — число мешающих КС,  $R'_j = \sqrt{I_j/S}$ ,  $I_j$  — случайная величина, которая равномерно распределена на интервале  $(0, 2\pi)$ .

На базе статистического алгоритма расчета вероятности ошибки [5] разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета и визуализации карт вероятности ошибки заданного региона для выбранной конфигурации системы связи.

С помощью созданного программного обеспечения была проанализирована ССС на ГО для обслуживания региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону, состоящая из четырех спутников. Приведем основные характеристики рассматриваемой модели ССС: тип модуляции — фазовая модуляция с  $M = 4$ ; коэффициент использования площади поверхности антенны земной станции — 0.5; отношение диаметра антенны земной станции к длине волны — 100; расположение КС на ГО —  $39.1^\circ$  в. д. (для КС, ориентированной на Воронеж),  $38.6^\circ$  в. д. (Харьков),  $40.1^\circ$  в. д. (Волгоград),  $39.6^\circ$  в. д. (Ростов-на-Дону); угловой размер сечения луча антенн КС —  $1.0^\circ$ ; половина ширины основного лепестка луча антенн КС по уровню  $-3$  dB составляет  $0.3^\circ$ .

В рассматриваемом примере за величину плотности распределения потребителей информации  $\sigma$  была принята плотность населения (количество человек на  $1 \text{ км}^2$ ) в выбранном регионе, а величина  $W$  определялась по правилу

$$W = \begin{cases} 10^1 & \text{для } P_{\text{оп}} > 10^{-1}, \\ 1/P_{\text{оп}} & \text{для } 10^{-1} \geq P_{\text{оп}} \geq 10^{-10}, \\ 10^{10} & \text{для } P_{\text{оп}} < 10^{-10}, \end{cases} \quad (2)$$

Значения величин  $\nu$  и  $\delta$  были приняты равными 1. Выбранный вариант регуляризации заметно не влияет на вклад надежного приема и ограничивает вклад неустойчивого приема информации.

Для описанного примера системы связи найдена оптимальная мощность бортового передатчика КС, равная 32 Вт, при этом погрешность вычислений мощности не превосходила 3 %.

На рис. 1 приведена зависимость показателя общественной полезности ССС  $Q$  от мощности бортового передатчика КС  $P$ . Из рисунка видно, что до точки  $P = 30$  Вт происходит быстрое увеличение величины  $Q$ , после чего оно замедляется, и кривая приобретает монотонный устойчивый характер. Исходя из этого, а также промежуточных расчетов и вида плотности  $\sigma$ , можно сделать вывод, что после точки  $P = 30$  Вт увеличение  $P$  слабо влияет на расширение зон устойчивого приема информации. Этот вывод подтверждает зависимость показателя эффективности ССС  $U$  от мощности  $P$  на рис. 2. При  $P = 32$  Вт величина  $U$  достигает своего максимума ( $U_{\max} = 5.46 \cdot 10^9$ ). На рис. 3 и 4 изображены соответственно энергетическая карта величины сигнал/помеха для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону

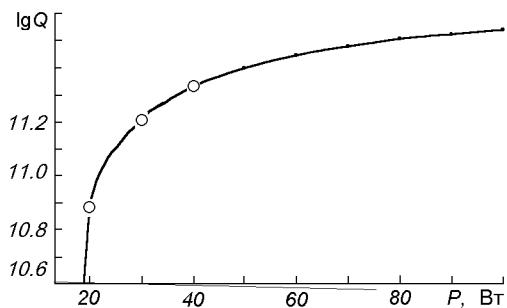


Рис. 1. Зависимость показателя общественной полезности ССС  $Q$  от мощности бортового передатчика КС  $P$

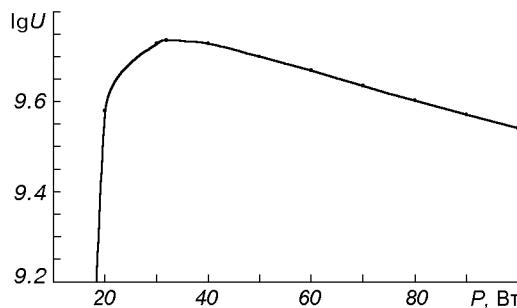


Рис. 2. Зависимость показателя эффективности ССС  $U$  от мощности бортового передатчика КС  $P$

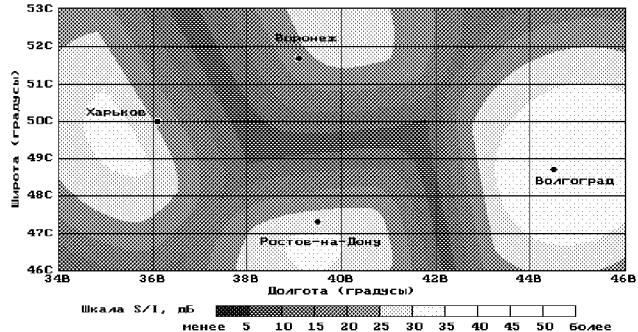


Рис. 3. Энергетическая карта величины сигнал/помеха для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону

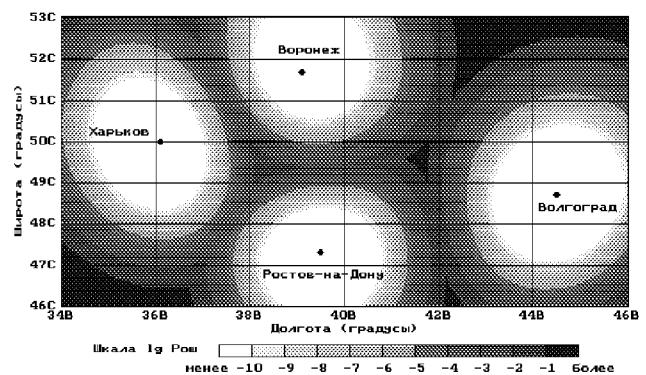


Рис. 4. Карта вероятности ошибки  $P_{\text{оп}}(x, y)$  для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону

ошибки  $P_{\text{ош}}(x, y)$  для ССС региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону при максимуме показателя эффективности ССС  $U$  ( $P = 30$  Вт). Эта карты получены с учетом имеющихся сведений (1993 г.) о плотности населения в регионе. Из представленных рис. 1—4 видно, что существует оптимальное значение мощности бортового передатчика КС, действующее в рамках выбранной конфигурации системы, региона и используемого критерия. Таким образом, появляется возможность целенаправленно выбирать конфигурацию системы связи с учетом свойств региона.

Таким образом, в настоящей работе по предложенному критерию проведен анализ эффективности системы спутниковой связи региона Воронеж—Харьков—Волгоград—Ростов-на-Дону для выбора оптимального значения мощности бортового передатчика космических станций. Результаты расчетов оказались устойчивыми относительно выбора значений параметров регуляризационной процедуры (2). На базе построенных алгоритмов и программных средств создан атлас региональных карт вероятности ошибки для различных конфигураций систем спутниковой связи, образованных из местных каналов передач. На основе полученных в работе характеристик и заданного общего критерия качества можно решать задачу полного синтеза системы спутниковой связи.

1. Александров Е. Е., Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Расчет вероятности ошибки при передаче фазоманипулированных сигналов в системах спутниковой связи для некоторых регионов Украины // Вестник науки и техники.—1997.—Вып. 1.—С. 48—52.
2. Калашников Н. И. Системы связи. — М.: Радио и связь, 1988.—428 с.
3. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988.—168 с.
4. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Пример построения региональных фазовых карт вероятности ошибок для выбранной конфигурации сети спутниковой связи // Элект-

- ронное моделирование.—1997.—19, № 5.—С. 120—124.
5. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Численные модели помехоустойчивости для украинских региональных сетей спутниковой связи // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 92—101.
6. Окунєв Ю. Б. Цифрова передача інформації фазомодулюрованими сигналами. — М: Радіо і зв'язь, 1991.—286 с.
7. Рафалович О. Я. Аналіз цифрових систем спутникової звязки по критерію помехоустойчивості приема-передачи інформації // Радіотехніка. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.—1997.—Вип. 104.—С. 134—137.
8. Спілкер Дж. Цифрова спутникова звязь: Пер. с англ. — М.: Свізь, 1979.—592 с.
9. Bartholome P. Digital satellite networks in Europe // Proc. IEEE.—1984.—72, N 11.—P. 1469—1482.
10. Jansky D. M., Jeruchim M. C. Communications satellite in the geostationary orbit. — N. Y.: Artech. House Inc., 1983.—519 p.
11. Jeruchim M. C. A survey of interference problems and applications to geostationary satellite networks // Proc. IEEE.—1977.—65, N 3.—P. 317—331.
12. Mileant A., Hinedi S. Overview of arraying techniques for deep space communications // IEEE Trans. Commun.—1994.—Pt. 3, 42, N 2—4.—P. 1856—1865.
13. Pelton J. N. Satellite telenets: a techno-economic assessment of major trends for the future // Proc. IEEE.—1984.—72, N 11.—P. 1445—1456.
14. Wu W. W., Miller E. F., Pritchard W. L. Mobile satellite communications // Proc. IEEE.—1994.—82, N 9.—P. 1431—1448.

#### CHOOSING THE POWER OF AIRBORNE TRANSMITTERS IN THE SPACE STATIONS FOR DIGITAL SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Ye. Ye. Alexandrov, O. Ya. Rafalovich

The construction of effective configuration for satellite communication systems is discussed. As an example, we analyse the digital satellite communication system for the Voronezh — Kharkiv — Volgograd — Rostov-na-Donu region. Based on the proposed performance criterion, we found the optimal power of the airborne transmitter for the space stations of this communication system. Regional maps of the error probability for different configurations of satellite communication systems were constructed with the use of the developed algorithms and software.

УДК 528.2:629.78+550.388.2

# Программное обеспечение «Klio» для определения параметров ионосферы

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 16.11.99*

Наводиться опис програмного забезпечення «Klio», призначеного для визначення параметрів іоносфери з обробки спостережень GPS-супутників. Результати обробки цією програмою даних GPS-спостережень на п'яти пунктах кампанії GEODUC'95 порівнюються з результатами, отриманими за допомогою комплекса Bernese v.3.5.

## ВВЕДЕНИЕ

Влияние ионосферы является одним из основных источников ошибок при проведении наблюдений GPS-спутников. В период повышенной солнечной активности ионосферная рефракция может достигать порядка 50 м [7]. На практике используются линейные комбинации фазовых наблюдений, которые в некотором приближении исключают влияние ионосферы. При этом используется тот факт, что GPS-спутники передают сигналы на двух частотах  $L1$  ( $f_1 = 1575.42$  МГц) и  $L2$  ( $f_2 = 1227.60$  МГц). Кроме этого, возможно использование различных моделей ионосферной рефракции. Следовательно, имея наблюдения GPS-спутников, можно решить обратную задачу, то есть, зная координаты некоторых станций, можно построить модель ионосферы над территорией, покрываемой этими станциями.

## ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «KLIO»

Программное обеспечение «Klio» предназначено для оценки параметров ионосферы из данных GPS-наблюдений. Данная программа написана на языке программирования Turbo Pascal 6.0 и содержит более 6500 строк.

Условно программу «Klio» можно разбить на следующие блоки:

- блок преобразования входных данных во внутренний формат;
- блок проверки качества данных и определения моментов скачков фаз;
- блок определения параметров ионосферы;
- блок вспомогательных программ.

Последний блок включает подпрограммы различных типов: дополнительные математические функции, квадратно-корневой информационный фильтр (SRIF) [2], подпрограммы преобразования эпох и т. д.

Входными данными служат файлы наблюдений GPS-спутников в формате RINEX [5, 6], точные эфемериды GPS-спутников в формате SP3 [9], объединенные ряды параметров вращения Земли (C04-файлы) [1]. Указанные входные файлы в форматах RINEX и SP3 являются текстовыми файлами, что делает неудобным их быструю обработку. Для записи их в бинарном формате служит блок входных данных.

## БЛОК ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ СКАЧКОВ ФАЗ

Во время наблюдений GPS-приемник регистрирует дробную часть фазы биения (т. е. разность между переданной GPS-спутником несущей волной и сигналом-копией, генерируемым приемником). Счет-

чик целых циклов увеличивается на единицу каждый раз, когда фаза изменяется с  $2\pi$  до 0. Значит, в заданную эпоху наблюдаемая фаза является суммой показателя счетчика целых чисел и дробной части фазы. Начальное целое количество циклов, соответствующее начальному расстоянию между GPS-спутником и GPS-приемником, является неизвестным. Эта фазовая неоднозначность остается постоянной до того момента, пока не будет перерыва в наблюдениях данного спутника. Перерыв в наблюдениях приводит к скачку фазы на целое количество циклов.

Причины, приводящие к скачку фазы, можно разбить на три типа:

- наличие препяд на пути распространения сигнала (деревья, строения, горы и т. д.);
- малое отношение уровня сигнала к шуму, вызванное неблагоприятными ионосферными условиями, дополнительными отражениями сигнала, малым углом места GPS-спутника и т. д.;
- сбой программного обеспечения GPS-приемника, приводящий к неправильной обработке сигнала.

Скачок фазы крайне редко может быть вызван и сбоями осциллятора на GPS-спутнике.

Каждый скачок фазы приводит к увеличению числа неизвестных параметров при обработке GPS-наблюдений. Поэтому для корректной обработки данных необходимо знание моментов всех скачков фазы. Для определения этих моментов, а также для маркировки выбросов, и служит данный блок.

Для проверки качества данных и определения моментов скачков фазы в качестве наблюдаемых величин используются линейные комбинации  $L3$  и  $L4$  [10]. Использование  $L4$  предпочтительнее, так как параметры ионосферы оцениваются при обработке именно этой комбинации, но в случае экстремальных ионосферных условий лучше использовать  $L3$ .

В данном блоке проверяется, можно ли фазовые наблюдения представить полиномом степени  $Q$  ( $Q \leq 2$ ) на определенном отрезке времени, содержащем  $Q+2$  эпохи наблюдений.

На первом шаге проводится процесс инициализации. Берутся первые  $Q+2$  наблюдения. Если  $Q+1$ -я производная интерполяционного полинома, аппроксимирующего эти наблюдения, равна нулю в пределах  $3\sigma$ , где  $\sigma$  — погрешность аппроксимации, определяемая точностью единичного наблюдения, то процесс инициализации завершен успешно, и первому наблюдению из проверяемого ряда присваивается флаг «скачок фазы». Иначе первое наблюдение рассматривается как выброс и маркируется. Тестируемый интервал сдвигается на одну эпоху, и процесс инициализации повторяется до успешного

завершения. После этого опять тестируемый интервал сдвигается на одну эпоху наблюдения, и опять проверяется на равенство нулю в пределах  $3\sigma$   $Q+1$ -я производная полинома для нового ряда наблюдений. Если это условие выполняется, то  $Q+2$ -е наблюдение из этого ряда принимается, и тестируемый интервал снова сдвигается на одну эпоху. Данный процесс повторяется до тех пор, пока рассматриваемая производная превысит  $3\sigma$ . В этом случае последнее наблюдение из тестируемого ряда маркируется, а его место занимает наблюдение в следующую эпоху. Замаркированное наблюдение трактуется как выброс. В случае, когда временной интервал между эпохами, соответствующими  $Q+1$ -му и  $Q+2$ -му наблюдениям в рассматриваемом ряду, превысит задаваемый интервал  $\Delta T$ , выбирается новый ряд наблюдений, в котором первым становится  $Q+2$ -е наблюдение из предыдущего ряда. Происходит процесс реинициализации, после успешного завершения которого осуществляется обратный ход для снятия маркировки с наблюдений, ошибочно принятых за выбросы. Самому раннему восстановленному наблюдению присваивается флаг «скачок фазы».

Входными параметрами являются

- тип линейной комбинации ( $L3$  или  $L4$ ),
- степень полинома  $Q$  ( $Q \leq 2$ ),
- интервал времени  $\Delta T$ ,
- ошибка единичного наблюдения.

Минимальное значение интервала  $\Delta T$  определяется из соотношения

$$\Delta T = (Q + 2)T_{\text{obs}},$$

где  $T_{\text{obs}}$  — интервал наблюдений. Максимальное значение  $\Delta T$  равно 10 мин. Значение ошибки единичного наблюдения может быть взято из интервала  $0.01 \div 0.10$  м [11].

## БЛОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

В данном блоке параметры ионосферы оцениваются в рамках модели тонкого слоя. Эта модель основывается на предположении, что все свободные электроны находятся на сферическом бесконечно тонком слое на некоторой высоте  $h_{\text{ion}}$  над земной поверхностью (рис. 1). Данная модель не является точной моделью ионосферы. Во-первых, рассматривается зависимость параметров ионосферы только от положения Солнца (местного солнечного времени). Во-вторых, модель тонкого слоя может быть названа моделью «замороженной» ионосферы. Ионосфера представляется как сферический слой с выпуклостью, движущийся над поверхностью Земли.

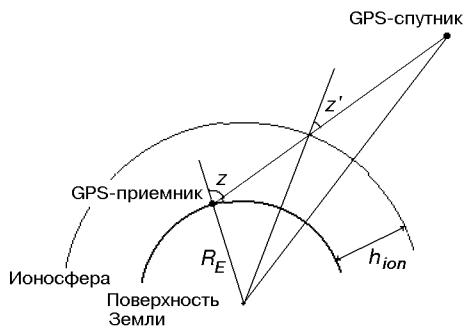


Рис. 1. Графическое представление модели тонкого слоя

ли синхронно с движением Солнца по небесной сфере. В-третьих, изменения со временем внутри ионосферы в модели тонкого слоя не рассматриваются.

Уравнения фазовых наблюдений можно записать в виде [12]:

$$\rho_R^S + \Delta\rho^{\text{tropo}} + \Delta\rho_1^{\text{ion}} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + N_1 \cdot \lambda_1 - \Phi_1 = v_1, \quad (1)$$

$$\rho_R^S + \Delta\rho^{\text{tropo}} + \Delta\rho_2^{\text{ion}} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + N_2 \cdot \lambda_2 - \Phi_2 = v_2, \quad (2)$$

где  $\rho_R^S$  — геометрическое расстояние между GPS-спутником и GPS-приемником;  $\Delta\rho^{\text{tropo}}$  — тропосферная рефракция;  $\Delta\rho_1^{\text{ion}}$ ,  $\Delta\rho_2^{\text{ion}}$  — ионосферные рефракции;  $\Delta t^S$  — ошибка часов GPS-спутника;  $\Delta t_R$  — ошибка часов GPS-приемника;  $N_1$ ,  $N_2$  — фазовые неоднозначности;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — длины волн несущих частот  $L1$  и  $L2$ ;  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  — фазовые наблюдения (в метрах);  $v_1$ ,  $v_2$  — остатки плюс немоделируемые ошибки;  $c$  — скорость света. Формируем фазовую комбинацию  $L4$ :

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (3)$$

Подставляем (1), (2) в (3):

$$(\Delta\rho_1^{\text{ion}} - \Delta\rho_2^{\text{ion}}) + (N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) - \Phi_4 = v_4, \quad (4)$$

где  $v_4 = v_1 - v_2$ .

Ионосферная рефракция на частоте  $f_j$  представлена в виде [8]:

$$\Delta\rho_j^{\text{ion}} = \pm \frac{C^{\text{ion}}}{f_j^2} TEC, \quad (5)$$

где

$$TEC = \int_0^r N_e dr \quad C^{\text{ion}} = e^2 / (8\pi^2 \epsilon_0 m_e),$$

— общее содержание электронов вдоль линии распространения сигнала (total electron

content);  $e$  — заряд электрона;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость свободного пространства;  $m_e$  — масса электрона;  $N_e$  — концентрация свободных электронов. Знак «+» используется для кодовых наблюдений, а знак «-» — для фазовых. В данном уравнении учитываются только члены, обратно пропорциональные  $f_j^2$ .

Уравнение (5) может быть записано в виде

$$\Delta\rho_j^{\text{ion}} = \pm \frac{C^{\text{ion}}}{f_j^2} TVEC \frac{1}{\cos z'}, \quad (6)$$

где  $TVEC$  — общее содержание электронов в зените;  $M(z)$  — коэффициент наклонения;  $z$  — зенитное расстояние GPS-спутника.

Простейший вид коэффициента наклонения:

$$M(z) = \frac{1}{\cos z'},$$

где

$$\sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_{\text{ion}}} \sin z$$

(рис. 1);  $R_E$  — средний радиус Земли. Так как значения фазовых неоднозначностей  $N_1$  и  $N_2$  в данном контексте нас не интересуют, то введем обозначение

$$N_4 = N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2. \quad (7)$$

Подставим (6) в (4) с учетом (7):

$$-\frac{C^{\text{ion}}}{\cos z'} TVEC \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_4. \quad (8)$$

$TVEC$  моделируется в виде разложения Тейлора по географической широте  $\varphi$  и часовому углу  $s$  Солнца:

$$TVEC(\varphi, s) = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik}(\varphi - \varphi_0)^i (s - s_0)^k, \quad (9)$$

где

$$E_{ik} = \frac{1}{i!k!} \left. \frac{\partial^{i+k} TVEC}{\partial \varphi^i \partial s^k} \right|_{\varphi_0, s_0} \quad (10)$$

$i = 0 \dots i_{\max}$ ,  $k = 0 \dots k_{\max}$ ,  $\varphi_0$ ,  $s_0$  — точка разложения. Часовой угол Солнца — угол между Солнцем и местным меридианом (положительный на запад). Местное солнечное время связано с часовым углом Солнца соотношением:

$$t_{\text{Sun}} = s + 12^h.$$

В данном алгоритме  $s_0$  — часовой угол Солнца, соответствующий середине интервала наблюдений,  $\varphi_0$  — среднее значение широт всех GPS-пунктов, используемых для вычисления модели.

Подставим (9) в (8):

$$-\frac{C_{\text{ion}}}{\cos z'} \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (s - s_0)^k \times \\ \times \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_4$$

Это уравнение линейно по отношению к неизвестным параметрам  $E_{ik}$  и константе  $N_4$ . Эти неизвестные параметры оцениваются рекурсивно с помощью квадратно-корневого информационного фильтра SRIF [2].

Выбор оптимальных максимальных степеней разложения Тейлора зависит от поведения ионосферы во времени и пространстве. Однако слишком большие значения степеней уменьшают реальность оцениваемых параметров. Наилучшие значения степеней разложения [12]:

1÷2 для широты и

2÷4 для часового угла Солнца,

если модель строится на четырехчасовом интервале наблюдений на территории, не превышающей по размерам континент. Максимальная степень разложения по часовому углу Солнца больше максимальной степени разложения по широте, так как в модели тонкого слоя территории, покрываемая по долготе, гораздо больше, чем территория, покрываемая по широте.

Входными параметрами для данного блока являются

- высота тонкого слоя  $h_{\text{ion}} = 300 \div 400$  км;
- количество GPS-пунктов, используемых для вычисления модели;
- степени разложения по часовому углу Солнца, по широте и для смешанных членов;
- минимальный угол места GPS-спутников  $\pi/2 - z$ ;
- тип коэффициента наклонения  $M(z)$ ;
- нормирующие множители для часового угла Солнца, широты и общего содержания электронов.

Результаты оценки параметров ионосферы по модели тонкого слоя не очень чувствительны к выбору высоты  $h_{\text{ion}}$ . Например, использование моделей тонкого слоя с высотами  $h_{\text{ion}}$ , отличающимися на 100 км, при определении координат пунктов наблюдений приводят к относительному изменению длин полученных баз приблизительно на  $0.04 \cdot 10^{-6}$  [4].

## ТЕСТОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работоспособности программного обеспечения «Klio» были обработаны наблюдения

Таблица 1. Сессии GPS-кампании GEODUC'95, которые использовались для тестирования работоспособности программы «Klio»

Сессия	2621	2631	2641	2651
BERG	—	—	21.09 7:54:15 22.09 4:38:15	22.09 16:52:45 23.09 6:55:15
LVIV	19.09 7:00:15 20.09 3:31:00	20.09 7:00:15 21.09 3:48:00	21.09 7:00:15 22.09 3:46:30	22.09 7:00:15 23.09 3:47:45
MORN	19.09 7:00:15 20.09 2:30:15	20.09 18:15:30 21.09 6:00:00	21.09 7:00:15 22.09 3:10:30	22.09 7:00:15 23.09 3:05:15
SEMN	19.09 7:00:15 20.09 2:00:15	20.09 6:51:15 21.09 1:55:00	21.09 7:00:15 22.09 2:00:00	22.09 6:56:45 23.09 2:02:15
UZHD	19.09 6:59:30 20.09 2:04:30	20.09 7:00:15 21.09 2:03:00	—	—

GPS-спутников, проходившие в рамках GPS-кампании GEODUC'95 [3]. Те же наблюдения были обработаны комплексом «Bernese v.3.5» [11] с теми же входными параметрами. Это позволило сравнить полученные результаты и оценить качество работы программы «Klio».

В табл. 1 приведены пункты и сессии наблюдений, использовавшиеся при данной обработке. Среди выбранных пунктов есть пункты как с хорошими условиями наблюдений (LVIV, SEMN, UZHD), так и с ограниченной видимостью спутников (MORN).

При проверке качества фазовых наблюдений использовались следующие входные параметры:

- тип линейной комбинации  $L4$ ;
- степень полинома  $Q = 1$ ;
- интервал времени  $\Delta T = 120$  с;
- ошибка единичного наблюдения 0.010 м.

Результаты проверки, выполненные программой «Klio», приведены в табл. 2, а в табл. 3 показан более подробный отчет для пункта LVIV, сессия 2621. Точно такие же результаты были получены при использовании комплекса «Bernese v.3.5».

Модели тонкого слоя строились в основном на четырехчасовых интервалах времени наблюдений с использованием данных с одного (LVIV), двух

Таблица 2. Результаты проверки качества фазовых наблюдений программой «Klio»

Станция	Сессия	Количество скачков фаз	Количество выбросов
BERG	2641	115	21
	2651	93	24
LVIV	2621	59	12
	2631	58	16
	2641	63	15
	2651	70	17
MORN	2621	130	37
	2631	81	13
	2641	116	15
	2651	132	20
SEMN	2621	43	2
	2631	46	1
	2641	49	0
	2651	49	3
UZHD	2621	116	13
	2631	97	12

Таблица 3. Подробные результаты проверки качества фазовых наблюдений программой «Klio» для пункта LVIV, сессия 2621

GPS-спутник	Скачки фазы, номера эпох	Выбросы, номера эпох	Количество скачков фазы	Количество выбросов
PRN 1	274, 290, 3881, 4533, 4559	—	5	0
PRN 2	2576, 3774, 3792	—	3	0
PRN 4	1482, 3847	4639, 4640	2	2
PRN 5	3520, 3542	3536	2	1
PRN 6	4219	—	1	0
PRN 7	1000, 1653, 3132	1696, 1697, 1710	3	3
PRN 9	3243	—	1	0
PRN 12	2762	—	1	0
PRN 14	744, 759	—	2	0
PRN 15	386, 1713	—	2	0
PRN 16	2222, 3321, 4856	—	3	0
PRN 17	1, 4804, 4826	—	3	0
PRN 18	1371	—	1	0
PRN 19	1866	—	1	0
PRN 20	3950	—	1	0
PRN 21	1	—	1	0
PRN 22	1, 1892, 2039, 2295, 2312	—	5	0
PRN 23	1, 3244, 3664	659, 660, 3657	3	3
PRN 24	1801, 4008, 4032	—	3	0
PRN 25	977, 4422	—	2	0
PRN 26	1, 32, 65, 93, 2754, 3949	76	6	1
PRN 27	2055	—	1	0
PRN 28	1	—	1	0
PRN 29	1146	—	1	0
PRN 31	1, 1120, 2825, 2885, 2919	3062, 3063	5	2
Всего		59	12	

Таблица 4. Модель ионосферы LVIV2626. (Станция LVIV. Центр разложения — 49.9177° с. ш., 23.9542° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			960	960
Количество наблюдений			5402	3310
Среднее квадратичное отклонение, м			0.057	0.057
Значения коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.8602	0.8706
	0	1	-0.0382	-0.0375
	0	2	0.0686	0.0686
	1	0	-0.1923	-0.1953
	1	1	-0.0128	-0.0101
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.0029	0.0030
	0	1	0.0011	0.0011
	0	2	0.0016	0.0016
	1	0	0.0013	0.0014
	1	1	0.0017	0.0018
Количествово использованных скачков фазы			14	13
Количествово неиспользованных скачков фазы			2	3

Таблица 5. Модель ионосферы LVSE2626. (Станция LVIV, SEMN. Центр разложения — 49.2269° с. ш., 23.4910° в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			1920	1920
Количество наблюдений			10942	10688
Среднее квадратичное отклонение, м			0.062	0.061
Значения коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.8757	0.8874
	0	1	-0.0525	-0.0504
	0	2	0.0476	0.0482
	1	0	-0.1893	-0.1965
	1	1	0.0033	0.0039
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.0022	0.0023
	0	1	0.0008	0.0008
	0	2	0.0013	0.0013
	1	0	0.0010	0.0010
	1	1	0.0013	0.0014
Количество использованных скачков фазы			28	27
Количествово неиспользованных скачков фазы			3	4

(LVIV, SEMN), трех (LVIV, SEMN, MORN или LVIV, SEMN, UZHD) и четырех (LVIV, SEMN, MORN, UZHD) GPS-пунктов. Используемые входные параметры:

- высота тонкого слоя  $h_{ion} = 350$  км
- степени разложения
  - по часовому углу Солнца 2
  - по широте 1
  - для смешанных членов 2

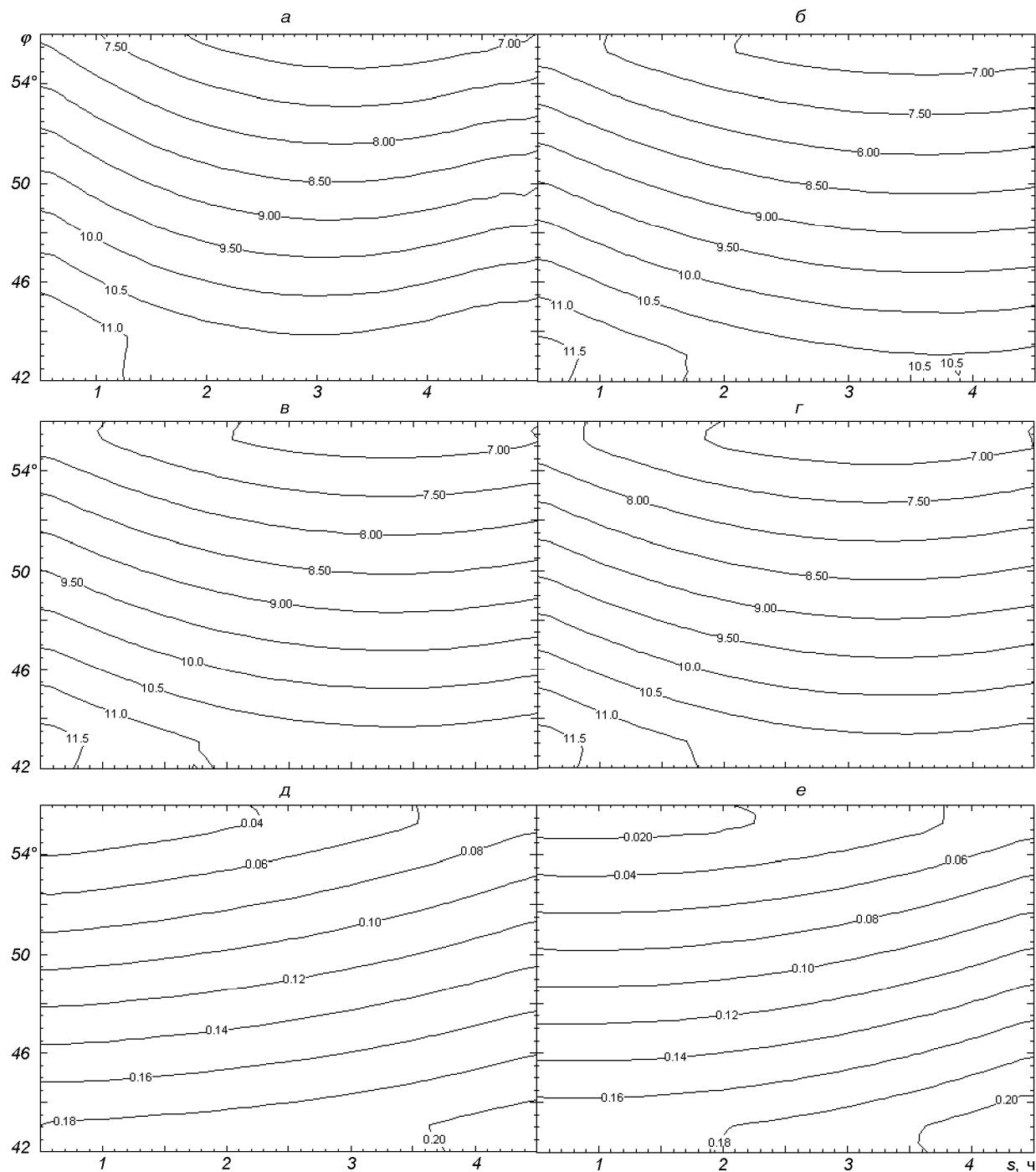


Рис. 2. Модели ионосферы (TVEC, TEGU), полученные с помощью программы «Klio»: *а* — LVIV2626, *б* — LVSE2626, *в* — LMS\_2626, *г* — LMSU2626, а также разности между ТЕС, полученными с помощью программ «Bernese v.3.5» и «Klio»: *д* — для модели LVSE2626, *е* — для модели LMSU2626

- минимальный угол места GPS-спутников  $15^\circ$ ;
- тип коэффициента наклонения  $M(z) = 1/(\cos z')$ ;
- нормирующие множители

для часового угла Солнца 2 ч,  
для широты  $6^\circ$ ,  
для общего содержания  
электронов  $10 \text{ TECU} = 10^{17} \text{ электронов}/\text{м}^2$ .

Таблица 6. Модель ионосферы LMS\_2626. (Станции LVIV, MORN, SEMN. Центр разложения —  $49.1965^{\circ}$  с. ш.,  $23.6256^{\circ}$  в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	«Klio»	«Bernese»
Количество эпох			2880	2880
Количество наблюдений			16284	15927
Среднее квадратичное отклонение, м			0.060	0.058
Значения коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.8797	0.8904
	0	1	-0.0408	-0.0389
	0	2	0.0537	0.0548
	1	0	-0.1936	-0.2009
	1	1	0.0007	0.0010
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.0018	0.0019
	0	1	0.0007	0.0007
	0	2	0.0010	0.0010
	1	0	0.0008	0.0009
	1	1	0.0011	0.0012
Количество использованных скачков фазы			56	53
Количество неиспользованных скачков фазы			9	12

Таблица 7. Модель ионосферы LMSU2626. (Станции LVIV, MORN, SEMN, UZHD. Центр разложения —  $49.0381^{\circ}$  с. ш.,  $23.3324^{\circ}$  в. д.; время (GPS): 9.09.1999 13:00)

Характеристика	i	k	Klio	Bernese
Количество эпох			3840	3840
Количество наблюдений			21807	21301
Среднее квадратичное отклонение, м			0.060	0.059
Значения коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.8767	0.8871
	0	1	-0.0425	-0.0404
	0	2	0.0543	0.0556
	1	0	-0.1944	-0.2025
	1	1	0.0052	0.0052
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов $E_{ik}$	0	0	0.0016	0.0016
	0	1	0.0006	0.0006
	0	2	0.0009	0.0009
	1	0	0.0007	0.0007
	1	1	0.0010	0.0010
Количество использованных скачков фазы			72	67
Количество неиспользованных скачков фазы			17	22

Некоторые полученные модели приведены в табл. 4—7 и на рис. 2, *a*—*г*. Значения коэффициентов разложения в ряд Тейлора, полученные обеими программами, довольно близки, и различия между моделями, построенными с использованием этих коэффициентов, невелики (рис. 2, *д*, *е*).

На рис. 3, *а* показано изменение общего содержа-

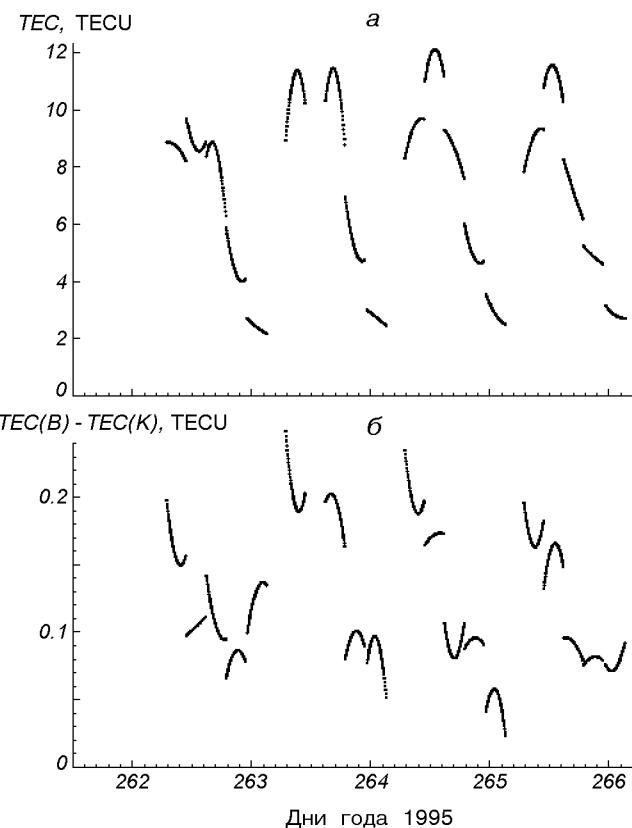


Рис. 3. Содержание электронов в зените над пунктом LVIV: *а* — общее содержание, полученное с помощью программы «Klio», *б* — разности между *TEC*, полученными с помощью программ «Bernese v.3.5» и «Klio»

ния электронов над пунктом LVIV во время проведения кампании GEODUC'95, полученное по моделям, рассчитанным программой «Klio».

Как видно из рис. 3, *б*, разности между *TEC* для этого пункта, полученными обеими программами, не превышает 0.25 TECU. Следует заметить, что средняя точность определения *TEC* при использовании модели тонкого слоя составляет 3÷4 TECU для GPS-пунктов в средних широтах [12].

## ВЫВОДЫ

Программное обеспечение «Klio» может быть использовано для оценки параметров ионосферы из данных GPS-наблюдений.

Оценка параметров ионосферы, полученная программой «Klio», находится в удовлетворительном согласии с результатами, полученными с помощью комплекса «Bernese v.3.5».

Автор выражает благодарность И. Ю. Гайовичу за консультации и ценные советы.

1. 1997 IERS Annual Report. Observatoire de Paris, 1998.
2. Bierman G. J. Factorization methods for diskrete sequential estimation. — New York: Acad. press, 1977.—241 p.
3. Gaiovitch I., Khoda O., Samoilenco A., Yatskiv Ya. GEODUC'95 GPS campaign data processing. comparisons to zero data Epoch ('93) // Proc. of the 4th International Seminar "GPS in Central Europe", Penc, 7—9 May 1997 // Reports on Geodesy.—1997.—N 4(27).—P. 351—362.
4. Georgiadou Y. Ionospheric delay modelling for GPS relative positioning // Proc. of the Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Ottawa. — Canada, 1990.—P. 403—410.
5. Gurtner W. RINEX: The receiver-independent exchange format // GPS World.—1994.—5, N 7.—P. 48—52.
6. Gurtner W., Mader G. Receiver independent exchange format version 2 // GPS Bulletin.—1990.—3, N 3.—P. 1—8.
7. Langley R. B. The GPS error budget // GPS World.—1997.—8, N 3.—P. 51—56.
8. Millman G. H. Ionospheric electron content effects on Earth-space radio propagation. A Review // Proc. of the International Beacon Satellite Symposium.—1979.—P. 323—339.
9. Remondi B. W. Extended the national geodetic survey standard GPS orbit formats // NOAA Technical Report NOS 133 NGS46.—November 1989.—P. 1—85.
10. Rothacher M. Orbits of Satellite Systems in Space Geodesy // Geodatisch-geophysikalische Arbeit in der Schweiz.—1992.—Vol. 46.
11. Rothacher M., Beutler G., Gurtner W., et al. Bernese GPS software version 3.4. — Documentation. 1993.
12. Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems: Permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz.—1994.—Vol. 48.

#### **KLIO SOFTWARE FOR THE ESTIMATION OF THE IONOSPHERIC PARAMETERS**

##### **O. Khoda**

Description of the Klio software intended for the estimation of ionospheric parameters from the GPS observations is presented. Results of the processing of the GPS observations at five GEODUC'95 sites obtained with Klio are compared with the results obtained with the Bernese GPS Software v.3.5.

УДК 621.396

# Методический подход и алгоритмы реализации дифференциального метода спутниковой навигации по наблюдениям сети контрольных станций

А. А. Жалило

Науково-виробниче підприємство «Хартрон-Альфа», Харків

*Надійшла до редакції 08.04.99*

---

Предложена методология построения и обработки измерительной информации сетей контрольных станций спутниковой дифференциальной навигации по сигналам GPS и ГЛОНАСС. На основе геометрического подхода получены оптимальные алгоритмы обработки наблюдений сетей контрольных станций и выработаны рекомендации по обработке информации и построению региональных и локальных дифференциальных подсистем GPS и ГЛОНАСС.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Устоявшийся традиционный подход к реализации дифференциального метода навигационных определений по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС с использованием отдельных контрольных станций (КС) достаточно исследован с точки зрения эффективности компенсации основных источников погрешностей навигационных определений. Однако, опыт его реализации не дает однозначного ответа на вопрос о том, как оптимально использовать результаты измерений информационно связанных нескольких КС или сети КС. Очевидно, и это подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями сетей дифференциальной навигации, что использование измерительной информации нескольких или значительного (избыточного) количества КС в сети, как предусматривается проектами EGNOS, WAAS и MSAS в составе глобальной системы GNSS-1 [4, 12—15], приводит к значительному

повышению качества дифференциальной коррекции и навигационных определений в целом (точности, надежности и др. показателей).

Особый практический интерес в настоящее время представляет построение региональных и локальных сетей КС, которые предполагают развертывание или объединение существующих КС на относительно небольших территориях (от десятков до сотен километров) и интегрирование их в глобальные сети, дополняя последние при решении специальных задач (категорированной посадки самолетов, швартовки кораблей и др.). В конкретной ситуации (конфигурация территории обслуживания, заданное количество КС, класс аппаратно-программных средств КС) возможны различные решения по построению сетей КС. При этом используют два принципиальных подхода к синтезу структуры и обработки информации сети КС: динамический (орбитальный) подход, использующий априорную информацию о моделях движения спутников СРНС, и гораздо более простой в реализации

геометрический подход. Первый подход, изложенный, например, в [10], целесообразно использовать в сетях КС широкозонной дифференциальной навигации (ШДН) значительной (2—4 тыс. км) и глобальной протяженности. Для региональных и локальных сетей КС предпочтительным является геометрический подход ввиду ограниченности территории размещения КС. Примеры использования геометрического подхода при построении сетей КС изложены в [16, 17].

Анализ показывает, что к настоящему времени пока не сложилась единая методологическая основа построения и оптимального использования сетей КС в практических задачах. Предлагаются как детерминистские, так и статистические алгоритмы обработки информации, которые обладают как достоинствами, так и недостатками. Например, детерминистский алгоритм [16] обработки наблюдений трехпунктной сети КС построен без использования каких-либо критериев оптимальности, не распространен на случай избыточного количества КС в сети и требует сопоставления со статистически оптимальными алгоритмами. Предложенный в [17] статистический подход, заключающийся в оптимизации весов наблюдений КС как по медленно изменяющимся, так и по флюктуационным составляющим погрешностей для достижения максимальной точности дифференциальной коррекции навигационных параметров потребителя, является весьма сложным и неудобным для массового потребителя. Указанный подход требует решения оптимизационной задачи самим потребителем, существенно усложняет ее с увеличением избыточности КС в сети, и поэтому может быть применен только при решении специальных задач, не требующих высокой оперативности навигационных определений. Наконец, рассмотренные схемы не удовлетворяют важному практическому требованию к алгоритмам обработки наблюдений — представлению выходной информации сети КС в унифицированных форматах GNSS (RTCM SC-104, ICAO SARPS). Выполнение этого требования позволило бы в максимальной степени использовать серийно выпускаемую аппаратуру потребителя (АП) GPS/ГЛОНАСС для реализации как традиционного, так и сетевого дифференциального метода навигационных определений.

Здесь предлагается универсальный методический подход к реализации региональных и локальных сетей КС, учитывающий необходимость информационной совместимости сети и массовой серийной АП, получены статистически оптимальные алгоритмы обработки наблюдений и предложены общие рекомендации по обработке информации и построению сетей КС.

## ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ. УСЛОВИЯ И КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пусть имеется сеть из  $M$  контрольных станций, каждая из которых формирует и передает в центр (центры) сети традиционные дифференциальные поправки к измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей относительно спутников СРНС GPS/ГЛОНАСС, формируемые как разности между измеренными и предвычисленными (по известным координатам КС и бортовым эфемеридам спутников СРНС) значениями дальностей и радиальных скоростей между КС и спутниками.

Ограничимся пока рассмотрением только псеводальномерных поправок с последующим распространением анализа и на скоростные параметры. Систему уравнений наблюдений сети КС на момент наблюдений  $t$  можно представить в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\nabla}_1^j = \hat{a}_{1x}^j \Delta X_j + \hat{a}_{1y}^j \Delta Y_j + \hat{a}_{1z}^j \Delta Z_j + \alpha_j + \Delta_1 + \\ \quad + \Delta_{1j}^{\text{атм}} + \delta_{1j}, \\ \hat{\nabla}_2^j = \hat{a}_{2x}^j \Delta X_j + \hat{a}_{2y}^j \Delta Y_j + \hat{a}_{2z}^j \Delta Z_j + \alpha_j + \Delta_2 + \\ \quad + \Delta_{2j}^{\text{атм}} + \delta_{2j}, \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ \hat{\nabla}_M^j = \hat{a}_{Mx}^j \Delta X_j + \hat{a}_{My}^j \Delta Y_j + \hat{a}_{Mz}^j \Delta Z_j + \alpha_j + \Delta_M + \\ \quad + \Delta_{Mj}^{\text{атм}} + \delta_{Mj}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $\hat{\nabla}_i^j$  — дифференциальные псевдодальномерные поправки, определенные на  $i$ -й КС ( $i = 1, \dots, M$ ) по сигналам  $j$ -го навигационного спутника ( $j = 1, \dots, p$ ) на фиксированный момент времени наблюдений;  $\hat{a}_{ix}^j, \hat{a}_{iy}^j, \hat{a}_{iz}^j$  — оценки частных производных псевдодальности по координатам  $X_j, Y_j$  и  $Z_j$   $j$ -го спутника (направляющие косинусы вектора « $i$ -я КС —  $j$ -й спутник»), т. е.

$$\hat{a}_{ix}^j = \frac{\hat{X}_j - \hat{x}_{Kc_i}}{\hat{R}_i^j}, \quad \hat{a}_{iy}^j = \frac{\hat{Y}_j - \hat{y}_{Kc_i}}{\hat{R}_i^j}, \quad \hat{a}_{iz}^j = \frac{\hat{Z}_j - \hat{z}_{Kc_i}}{\hat{R}_i^j},$$

$\hat{x}_{Kc_i}$ ,  $\hat{y}_{Kc_i}$  и  $\hat{z}_{Kc_i}$  — оценки координат  $i$ -й КС;  $\Delta X_j$ ,  $\Delta Y_j$  и  $\Delta Z_j$  — неизвестные погрешности определения координат  $j$ -го спутника на момент времени излучения сигнала (с учетом поправок на вращение Земли) в Гринвичской геоцентрической системе координат по бортовой эфемеридной информации, включающие преднамеренные искажения эфемерид в режиме SA (Selective Availability) GPS ( $\epsilon$ -процесс режима SA);  $\alpha_j$  — величина, пропорциональная погрешности ввода бортовых частотно-временных поправок в измерения псевдодальности для  $j$ -го спутника относительно системных шкал СРНС, включая погрешности преднамеренных искажений

в режиме SA GPS ( $\delta$ -процесс режима SA);  $\Delta_i$  — медленно изменяющиеся погрешности измерений, обусловленные погрешностями неточной синхронизации шкалы времени  $i$ -й КС относительно системной шкалы времени какой-либо из СРНС по результатам навигационно-временных определений самой КС;  $\Delta_{ij}^{\text{атм}}$  — медленно изменяющиеся погрешности измерений, обусловленные погрешностями влияния среды распространения сигналов навигационных спутников (ионосфера и тропосфера), а также погрешностями из-за неточной геодезической привязки фазовых центров приемных антенн КС (примем последние пренебрежительно малыми в предположении геодезической привязки КС с сантиметровой точностью);  $\delta_{ij}$  — флюктуационные погрешности измерений (коррелированные по времени погрешности многолучевого распространения сигналов, погрешности из-за неоднородности среды распространения сигналов и некоррелированные шумовые погрешности) с известными статистическими характеристиками.

Систему (1) запишем в векторно-матричной форме

$$\hat{V}^j = A_j \Delta X_j + \alpha_j I + \Delta + \Delta_{ij}^{\text{атм}} + \delta_j,$$

где  $\hat{V}^j$  — вектор координатных дифференциальных поправок КС к псевдодальностям  $j$ -го спутника;  $A_j$  — матрица частных производных ( $\dim A_j = [M] \times [3]$ ),  $\Delta X_j = \|\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j\|^T$  — вектор неизвестных поправок к бортовым эфемеридным координатам  $j$ -го спутника СРНС,  $I$  — единичный вектор размерности  $M$ ,  $\Delta = \|\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_M\|^T$ ,  $\Delta_j^{\text{атм}} = \|\Delta_{1j}^{\text{атм}}, \Delta_{2j}^{\text{атм}}, \dots, \Delta_{Mj}^{\text{атм}}\|^T$ ,  $\delta_j = \|\delta_{1j}, \delta_{2j}, \dots, \delta_{Mj}\|^T$ .

Введем по аналогии с [17] преобразование

$$\Delta X_j = T_j \Delta e_j. \quad (2)$$

Здесь  $T_j$  — ортогональная матрица ( $T_j^{-1} = T_j^T$ ) разворота осей орбитальной системы координат  $j$ -го спутника в Гринвичской геоцентрической системе. Элементы матрицы  $T_j$  могут быть однозначно определены с высокой точностью из определения орбитальной (связной) системы координат. Ее начало — координаты  $X_j$  спутника, одну плоскость (плоскость орбиты) определяют радиус-вектор спутника  $X_j$  и вектор  $V_j$  его скорости, другая плоскость перпендикулярна к плоскости орбиты, проходящей через спутник, которой принадлежит вектор  $V_j$ . Например, ось  $X_j$  орбитальной системы координат определяется направлением вектора  $V_j$ , ось  $Y_j$  перпендикулярна к вектору  $V_j$  и для круговой орбиты направлена по радиусу-вектору спутника  $X_j$  от центра Земли, ось  $Z_j$  дополняет орбитальную систему координат до правой;

$$\Delta e_j = \|\Delta L_j, \Delta r_j, \Delta n_j\|^T$$

$\Delta L_j$ ,  $\Delta r_j$  и  $\Delta n_j$  — составляющие вектора погрешности положения  $j$ -го спутника в орбитальной системе координат (вдоль орбиты, вдоль радиуса-вектора и по бинормали к плоскости орбиты соответственно).

Преобразование (2) удобно тем, что случайные погрешности  $\Delta L_j$ ,  $\Delta r_j$  и  $\Delta n_j$  обычно не коррелируют между собой и слабо зависят от времени на интервале между закладками эфемерид на борт спутника наземным комплексом управления СРНС. Статистические характеристики этих погрешностей будем полагать известными [2]:

$$\langle \Delta L_j \rangle = \langle \Delta r_j \rangle = \langle \Delta n_j \rangle = 0;$$

$$\langle \Delta L_j^2 \rangle = \sigma_L^2; \langle \Delta r_j^2 \rangle = \sigma_r^2 \text{ и } \langle \Delta n_j^2 \rangle = \sigma_n^2,$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций.

Обратное преобразование (2) приводит к статистической зависимости элементов вектора  $\Delta X_j$ .

Оценки указанных статистических характеристик могут быть получены как из независимых источников (континентальные и глобальные сети КС), так и из результатов рекуррентной обработки предыдущих наблюдений самой сети.

Будем полагать также известными статистические характеристики величин  $\alpha_j$  (т. е.  $\langle \alpha_j \rangle = 0$ ;  $\langle \alpha_j^2 \rangle = \sigma_\alpha^2$ ) и некоррелированность (или слабую коррелированность) величин  $\alpha_j$  и элементов вектора  $\Delta e_j$ .

Таким образом, в общем случае будем полагать известной априорную информацию о математическом ожидании и корреляционной матрице эфемеридно-временных погрешностей спутников СРНС

$$\langle \Theta_j \rangle = 0, \quad K_\Theta = \langle \Theta_j \Theta_j^T \rangle, \quad (3)$$

$$\text{где } \Theta_j = \|\Delta L_j, \Delta r_j, \Delta n_j, \alpha_j\|^T$$

С учетом (2) и (3) систему уравнений (1) можно представить в виде

$$\hat{V}^j = A_j T_j \Delta e_j + \alpha_j I + \Delta + \Delta_j^{\text{атм}} + \delta_j,$$

или

$$\hat{V}^j = D_j \Theta_j + \Delta + \Delta_j^{\text{атм}} + \delta_j, \quad (4)$$

$$\text{где } D_j = \|A_j T_j : I\|, \text{ причем } D_j = [M] \times [4].$$

Полагаем также известными с достаточной степенью точности статистические характеристики вектора флюктуационных погрешностей измерений, т. е.

$$\langle \delta_j \rangle = 0; \langle \delta_j \delta_j^T \rangle = K_\delta.$$

По аналогии с (1) запишем уравнения и модель погрешностей измерений у потребителя с приблизительно известными координатами  $\tilde{x}_n$ ,  $\tilde{y}_n$  и  $\tilde{z}_n$

$$\hat{S}_\Pi^j = R_\Pi^j + \Delta_\Pi + \|\hat{a}_{\Pi x}^j, \hat{a}_{\Pi y}^j, \hat{a}_{\Pi z}^j\|T_j \Delta e_j + \\ + \alpha_j + \Delta_{\Pi j}^{\text{атм}} + \delta_{\Pi j},$$

где  $R_\Pi^j = \sqrt{(x_\Pi - X_j)^2 + (y_\Pi - Y_j)^2 + (z_\Pi - Z_j)^2}$  — геометрическая дальность  $j$ -го спутника относительно потребителя;

$$\hat{a}_{\Pi x}^j = \frac{\hat{X}_j - \tilde{x}_\Pi}{\tilde{R}_\Pi^j}, \quad \hat{a}_{\Pi y}^j = \frac{\hat{Y}_j - \tilde{y}_\Pi}{\tilde{R}_\Pi^j}, \quad \hat{a}_{\Pi z}^j = \frac{\hat{Z}_j - \tilde{z}_\Pi}{\tilde{R}_\Pi^j};$$

$\Delta_{\Pi j}^{\text{атм}}$  — суммарная ионосферная и тропосферная погрешности измерений;  $\delta_{\Pi j}$  — флюктуационная составляющая погрешности измерений.

Последнее выражение перепишем в виде

$$\hat{S}_\Pi^j = \hat{R}_\Pi^j + \Delta_\Pi + \mathbf{G}_j^T \Theta_j + \Delta_{\Pi j}^{\text{атм}} + \delta_{\Pi j}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{G}_j^T = \|\hat{g}_{\Pi x}^j, \hat{g}_{\Pi y}^j, \hat{g}_{\Pi z}^j, 1\| = \|\mathbf{C}_j^T : 1\|, \\ \|\hat{g}_{\Pi x}^j, \hat{g}_{\Pi y}^j, \hat{g}_{\Pi z}^j\| = \|\hat{a}_{\Pi x}^j, \hat{a}_{\Pi y}^j, \hat{a}_{\Pi z}^j\| T_j = \mathbf{C}_j^T.$$

В общем случае задачи дифференциальной коррекции сводятся к отысканию такого линейного преобразования элементов вектора  $\hat{\nabla}^j$ , которое бы позволило скомпенсировать в максимальной степени вклад таких медленно изменяющихся погрешностей измерений АП, как эфемеридные, частотно-временные и атмосферные. Особенно необходимо выделить эфемеридные и частотно-временные погрешности при функционировании спутников GPS в режиме SA, когда СКО псевдодальности достигают значений 30 м, а псевдоскорости — 15 см/с. Тропосферные и ионосферные погрешности могут быть значительно уменьшены с использованием моделей высотного профиля показателя преломления. Кроме того, для компенсации ионосферной составляющей можно использовать двухчастотные измерения. Искомое преобразование, во-первых, должно быть таким, чтобы для любого  $j$ -го спутника линейная комбинация вектора  $\Delta$  неточной синхронизации шкал времени КС была одинаковой (тогда расхождения шкал времени КС не приведут к ошибкам в определении координат АП, а скажутся только на определении времени). Во-вторых, оно должно так минимизировать вклад флюктуационных составляющих измерений КС, чтобы остаточные погрешности дифференциальной коррекции были минимальны в среднеквадратичном смысле как по медленно изменяющейся, так и по флюктуационной составляющим.

Таким образом, задача заключается в отыскании подходов и алгоритмов, позволяющих наилучшим образом использовать результаты измерений сети КС для компенсации медленно изменяющихся по-

грешностей у потребителя в различных условиях и при различных количествах КС в составе дифференциальной сети.

С учетом представленных рассуждений будем искать вектор дифференциальных поправок сети в виде линейной комбинации дифференциальных коррекций (4) так, чтобы был минимальным средний квадрат невязки  $\varepsilon$ :

$$\langle \varepsilon_j^2 \rangle = \langle [(\mathbf{G}_j^T \Theta_j + \Delta_{\Pi j}^{\text{атм}}) - \mathbf{p}_j^T \hat{\nabla}^j]^2 \rangle \rightarrow \min_{\mathbf{p}_j} \quad (6)$$

при условии

$$\sum_{j=1}^M \mathbf{p}_j = 1, \text{ или } \mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1, \quad (7)$$

где  $\mathbf{p}_j$  — искомый вектор весовых коэффициентов дифференциальных поправок  $\hat{\nabla}^j$ .

Прежде чем выполнить решение оптимизационной задачи, необходимо обсудить ряд важных особенностей, допущений и ограничений, конкретизирующих постановку и условия решения задачи.

Из (4) следует, что при наличии достаточного или избыточного количества КС в сети ( $M \geq 4$ ) эфемеридные и частотно-временные составляющие погрешностей измерений ( $\Delta e_j$  и  $\alpha_j$ ), являющиеся одними и теми же для всех КС сети (для  $j$ -го спутника и фиксированного момента времени), могут быть оценены из уравнений (4) и преобразованы в дифференциальные поправки псевдодальностей, измеренных потребителем, с учетом его (даже приближенного) местоположения. При этом атмосферные и флюктуационные погрешности измерений КС, а также разные расхождения шкал времени КС относительно системной шкалы одной из СРНС (или расхождения часов КС между собой) приведут к погрешностям определения дифференциальных коррекций у потребителя. Для уменьшения влияния этих факторов на точность дифференциальной коррекции измерений потребителя необходимо применять известные способы уменьшения этих составляющих. Так, обычно на КС используют эффективную совместную фильтрацию кодовых и фазовых псевдодальностей на протяженных (15—30 с) интервалах времени, модели тропосферы и ионосферы, двухчастотный метод компенсации ионосферной погрешности, модели поведения часов КС для более точной синхронизации с часами СРНС и т. п. Кроме того, избыточные измерения позволяют включать в вектор оцениваемых параметров и расхождения шкал времени КС. Сложнее обстоит решение поставленной задачи в недоопределенном случае, когда число КС в сети не превышает трех ( $M = 2, 3$ ), и эффективность компенсации эфемеридных и частотно-временных погрешно-

стей наблюдений без использования надежной априорной информации может быть заметно уменьшена. В то же время при оптимальной обработке дифференциальных поправок нескольких КС можно добиться более высокой точности дифференциальной коррекции, чем при использовании одной КС. Для этого важно правильно перераспределить объем измерительной информации КС в соответствии с априорными знаниями о соотношениях различных составляющих погрешностей измерений у потребителя, чтобы добиться максимальной эффективности их компенсации. Так, в [16, 17] принималось, что радиальная составляющая меньше, чем продольная и поперечная, а в [17] принималось также, что дисперсии продольной и поперечной составляющих бортовых эфемеридных погрешностей равны.

Таким образом, при дальнейшем анализе следует учитывать следующее.

В первую очередь целесообразно учесть априорную информацию о флюктуационных погрешностях, погрешностях рассинхронизации шкал времени КС сети и атмосферных погрешностях, либо оценить их вклад.

Полагая, что корреляционная матрица флюктуационных погрешностей наблюдений КС (включая эффект многолучевости) может быть достаточно точно вычислена при фильтрации наблюдений КС, рассмотрим более детально погрешности рассинхронизации шкал времени КС и вопрос учета атмосферных погрешностей применительно к решаемой задаче.

Погрешности неточной синхронизации шкал времени КС относительно системной шкалы СРНС при оснащении КС сравнительно недорогими кварцевыми часами могут достигать десятков и даже сотен метров (в режиме SA GPS). Для сети КС с независимой коррекцией часов на каждой КС, когда расхождения шкал КС не включаются в вектор оцениваемых параметров, вектор  $\Delta$  в (4) может быть представлен как

$$\Delta = \Delta_0 \mathbf{I} + \eta_t, \quad (8)$$

где  $\Delta_0$  — среднее значение расхождений шкал времени КС и СРНС;  $\mathbf{I}$  — единичный вектор;  $\eta_t$  — отклонения шкал времени КС от величины  $\Delta_0$ . Величины элементов вектора  $\eta_t$  зависят главным образом от того, насколько разнятся условия измерений и обработки измерительной информации на разных КС сети. Разнос КС в пространстве приводит к различию атмосферных погрешностей измерений КС и к возможной работе КС по различным созвездиям спутников СРНС. Использование разнотипных КС также может привести к увеличению

разброса оценок  $\hat{\Delta}_i$ , поскольку у них могут использоваться различные аналоговые фильтры и алгоритмы фильтрации [11]. Если при формировании итоговых дифференциальных поправок сети для всех спутников рабочего созвездия потребителя добиться равного вклада погрешностей ухода часов КС при максимальной компенсации остальных погрешностей, то это приведет у потребителя к погрешности определения времени, но не координат. Это условие должно быть учтено при решении оптимизационной задачи. Кроме того, при создании сети КС важно потребовать, чтобы сеть состояла из однотипных элементов.

Погрешности рассинхронизации часов КС для близких пунктов (до 300 км) могут быть относительно невелики (при одном и том же рабочем созвездии спутников и одной и той же бортовой информации) и будут определяться флюктуационными и атмосферными погрешностями. При значительном разносе КС (1000 км и более) вероятность работы всех КС сети по одному и тому же созвездию навигационных спутников значительно уменьшается. Поэтому погрешности рассинхронизации КС могут увеличиваться, что приведет к необходимости строить избыточную сеть и включать параметры рассинхронизации в вектор оцениваемых параметров. При этом целесообразно использовать на КС высокостабильные (рубидиевые или цезиевые) стандарты частоты и времени, чтобы моделировать их поведение с высокой точностью, несмотря на увеличение стоимости оборудования КС.

Выполнение условия (7) позволит для всех спутников из рабочего созвездия сети получить одну и ту же величину (см. (8))

$$\mathbf{p}_j^T \Delta_0 \mathbf{I} = \Delta_0 \mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = \Delta_0,$$

которая у потребителя приведет к сдвигу шкалы времени, но не приведет к смещениям в оценке его координат. С учетом этого выражение для вектора  $\hat{\nabla}_\Delta^j$  в (6) можно представить как

$$\hat{\nabla}_\Delta^j = \hat{\nabla}^j - \Delta_0 \mathbf{I} = \mathbf{D}_j \Theta_j + \Delta_j^{atm} + \gamma_j, \quad (9)$$

где  $\gamma_j = \eta_t + \delta_j$ .

Невязка  $\varepsilon_j$  в (6) равна

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= \mathbf{G}_j^T \Theta_j + \Delta_{pj}^{atm} - \mathbf{p}_j^T \hat{\nabla}_\Delta^j = \\ &= (\mathbf{G}_j^T - \mathbf{p}_j^T \mathbf{D}_j) \Theta_j - \mathbf{p}_j^T \eta_t - \mathbf{p}_j^T \delta_j + (\Delta_{pj}^{atm} - \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{atm}). \end{aligned}$$

Результирующая атмосферная погрешность дифференциальной коррекции  $\varepsilon_{atm} = \Delta_{pj}^{atm} - \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{atm}$  может быть уменьшена за счет использования модельной зависимости показателя преломления атмосферы

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{атм}_j}^* &= k_{\text{атм}} \varepsilon_{\text{атм}_j} = k_{\text{атм}} (\Delta_{\Pi j}^{\text{атм}} - p_j^T \Delta_j^{\text{атм}}) = \\ &= k_{\text{тр}} (\Delta_{\Pi j}^{\text{тр}} - p_j^T \Delta_j^{\text{тр}}) + k_{\text{ион}} (\Delta_{\Pi j}^{\text{ион}} - p_j^T \Delta_j^{\text{ион}}),\end{aligned}$$

где значения коэффициентов для тропосферы и ионосферы обычно принимают равными

$$k_{\text{тр}} = 0.05 \dots 0.1, \quad k_{\text{ион}} = 0.5 \dots 0.6.$$

При двухчастотной компенсации ионосферных погрешностей измерений на КС и в аппаратуре потребителей в задаче необходимо учитывать соответствующее увеличение флюктуационных погрешностей  $\delta_j$ .

В предположении независимости источников и составляющих погрешностей  $\Theta_j$ ,  $\eta_t$ ,  $\delta_j$  и  $\varepsilon_{\text{атм}_j}^*$  можно получить

$$\begin{aligned}\langle \varepsilon_j^2 \rangle &= (G_j^T - p_j^T D_j) K_{\Theta_j} (G_j^T - p_j^T D_j)^T + \\ &+ p_j^T K_{\eta_t} p_j + p_j^T K_{\delta_j} p_j + \langle (\varepsilon_{\text{атм}_j}^*)^2 \rangle,\end{aligned}\quad (10)$$

где  $K_{\Theta_j}$  — корреляционная матрица эфемеридных и частотно-временных погрешностей навигационных спутников СРНС (3);  $K_{\delta_j} = \langle \delta_j \delta_j^T \rangle$  — корреляционная матрица флюктуационных погрешностей измерений КС (включая эффект многолучевости), которая может быть достаточно точно вычислена в центре обработки сети при фильтрации измерений КС;  $K_{\eta_t}$  — корреляционная матрица отклонений времени КС и СРНС  $\eta_t$  от среднего значения  $\Delta_0$ .

Вектор  $\eta_t$  можно считать случайным вектором с нулевым средним и некоррелированными компонентами, дисперсии которых также могут быть оценены при обработке информации сети КС. Тогда можно ввести суммарный случайный вектор  $\xi_j = \eta_t + \delta_j$  с известными статистическими характеристиками, причем  $K_{\xi_j} = K_{\eta_t} + K_{\delta_j}$ .

Точность дифференциальной коррекции воздействия атмосферных эффектов (с учетом дополнительной модельной коррекции) зависит главным образом от различия условий измерений на КС сети и в аппаратуре потребителя и адекватности моделей тропосферы и ионосферы. Многообразие условий измерений может значительно сказаться на решении оптимизационной задачи. Так, например, атмосферные погрешности измерений приземных объектов (в том числе и КС) значительно отличаются от погрешностей измерений на борту воздушных судов или космических аппаратов. Поэтому в идеале оптимизационная задача должна решаться применительно к конкретным условиям расположения КС и потребителя, что может быть реализовано при решении специальных задач, в частности, с послесеансной обработкой результатов

измерений аппаратуры потребителей и КС. В большинстве случаев при использовании сети КС для дифференциальной навигации мобильных приземных объектов в реальном масштабе времени такой подход неприемлем. Поэтому представляется целесообразным при оптимизации обработки наблюдений сети КС не учитывать атмосферные составляющие погрешности измерений, предполагая их высокоточную коррекцию в наблюдениях КС, а после оценки элементов вектора  $p$  (весов наблюдений) оценить вклад данной составляющей в погрешности дифференциальной коррекции. Направления уменьшения атмосферной составляющей погрешностей измерений состоят в:

- использовании моделей тропосферы и ионосферы как на КС (целесообразно также на КС использовать датчики метеопараметров), так и в АП;

- учите тропосферных поправок в АП (после дифференциальной коррекции) с использованием одной модели высотного профиля показателя преломления;

- уточнении текущих параметров ионосферы по измерениям сети КС и передаче этих параметров потребителю, как это предложено в [10, 13, 15].

Для локальных сетей КС с измерительными базисами около 300 км, когда параметры тропосферного и ионосферного слоя примерно одинаковы на территории размещения КС, для приземных потребителей в зоне действия сети возможно уменьшение атмосферных составляющих погрешностей измерений псевдодальности до субдекиметрового уровня [16]. Для сетей КС большой протяженности (1000 км и более) происходит декорреляция атмосферных погрешностей измерений и требуется их точный учет для компенсации в АП.

Таким образом, с учетом изложенного целевая функция оптимизации имеет вид

$$\begin{aligned}F(p_j) = \langle \varepsilon_j^2 \rangle &= (G_j^T - p_j^T D_j) K_{\Theta_j} (G_j^T - p_j^T D_j)^T + \\ &+ p_j^T K_{\xi_j} p_j \rightarrow \min_{p_j}\end{aligned}\quad (11)$$

при ограничении  $p_j^T I = 1$ .

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ СЕТИ КОНТРОЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрим достижение минимума функции (11) пока без учета представленного выше ограничения, что соответствует случаю высокоточной синхронизации часов КС и СРНС.

Продифференцируем (11) по элементам вектора  $p_j$  и приравняем результат нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial p_j} [G_j^T K_{\Theta_j} G_j - 2p_j^T D_j K_{\Theta_j} G_j + p_j^T D_j K_{\Theta_j} D_j^T p_j + \\ + p_j^T K_{\xi_j} p_j] = 0. \end{aligned}$$

После преобразований получим

$$p_j = [D_j K_{\Theta_j} D_j^T + K_{\xi_j}]^{-1} D_j K_{\Theta_j} G_j \quad (12)$$

или

$$p_j^T = G_j^T K_{\Theta_j} D_j^T [D_j K_{\Theta_j} D_j^T + K_{\xi_j}]^{-1}, \quad \text{dim} p_j = [M]. \quad (13)$$

Тогда сетевая дифференциальная поправка по  $j$ -му навигационному спутнику будет иметь вид

$$p_j^T \hat{V}^j = G_j^T K_{\Theta_j} D_j^T [D_j K_{\Theta_j} D_j^T + K_{\xi_j}]^{-1} \hat{V}^j, \quad (14)$$

а оценка искомого вектора эфемеридно-временных погрешностей  $\Theta_j$ :

$$\hat{\Theta}_j = K_{\Theta_j} D_j^T [D_j K_{\Theta_j} D_j^T + K_{\xi_j}]^{-1} \hat{V}^j, \quad \text{dim} \Theta_j = [4]. \quad (15)$$

Состав оценок (15) соответствует стандартным форматам данных для передачи дифференциальных поправок в сетях широкозонной дифференциальной навигации [15]. Поэтому сети КС, построенные на указанных принципах, легко адаптировать к стандартам ШДН. Это особенно важно для поэтапного наращивания количества КС в сети. Кроме того, использование стандартных форматов создает предпосылки для интеграции региональных, локальных и глобальных сетей КС, позволяет унифицировать АП и максимально использовать существующую аппаратуру.

С использованием известной формулы обращения матриц вида  $A = B + CDE$  ( $B^{-1}$  и  $D^{-1}$  существуют):

$$A^{-1} = B^{-1} - B^{-1}C(D^{-1} + EB^{-1}C)^{-1}EB^{-1},$$

выражение (15) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} [D_j K_{\Theta_j} D_j^T + K_{\xi_j}]^{-1} = \\ = W_{\xi_j} - W_{\xi_j} D_j [D_j^T W_{\xi_j} D_j + K_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} D_j^T W_{\xi_j}, \end{aligned}$$

где  $W_{\xi_j} = K_{\xi_j}^{-1}$  — весовая матрица флюктуационных погрешностей измерений КС, включая погрешности рассинхронизации часов КС.

Тогда оценка вектора  $\Theta_j$  приобретает вид

$$\hat{\Theta}_j = K_{\Theta_j} \{E - D_j^T W_{\xi_j} D_j [D_j^T W_{\xi_j} D_j + K_{\Theta_j}^{-1}]^{-1}\} D_j^T W_{\xi_j} \hat{V}^j,$$

где  $E$  — единичная матрица,  $\text{dim} E = [4] \times [4]$ .

Используя повторно приведенную выше формулу обращения матриц, получим

$$E - D_j^T W_{\xi_j} D_j [D_j^T W_{\xi_j} D_j + K_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} =$$

$$= [E + D_j^T W_{\xi_j} D_j K_{\Theta_j}]^{-1} = K_{\Theta_j}^{-1} [D_j^T W_{\xi_j} D_j + K_{\Theta_j}^{-1}]^{-1}.$$

Окончательно имеем

$$\hat{\Theta}_j = [D_j^T W_{\xi_j} D_j + K_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} D_j^T W_{\xi_j} \hat{V}^j. \quad (16)$$

Выражение (16) есть не что иное как оценка по методу максимума апостериорной вероятности (МАВ, или байесова оценка) [3, 5, 6] при условии, что априорное значение вектора  $\hat{\Theta}_{A_j}$  равно нулю.

Таким образом, принятый критерий оптимальности решения представленной задачи соответствует байесову подходу с ограниченными сведениями о статистических характеристиках априорного распределения вероятности вектора  $\Theta_j$ , таких как среднее значение и корреляционная матрица, которые являются достаточными при допущении о нормальности априорного распределения. Известно [3, 5, 6], что такая оценка является наилучшей при наличии надежной априорной информации об оцениваемых параметрах, а свойства таких оценок достаточно хорошо изучены. При ненадежной априорной информации необходимо пользоваться методом максимального правдоподобия (МП), согласно которому оценка искомого вектора записывается в виде

$$\hat{\Theta}_j = [D_j^T W_{\xi_j} D_j]^{-1} D_j^T W_{\xi_j} \hat{V}^j. \quad (17)$$

Оценка (16) принадлежит к классу смещенных, однако обладает меньшей среднеквадратической ошибкой (дисперсия + квадрат смещения), чем оценка (17).

Использование МП-оценок (или МНК-оценок) вполне оправданно при достаточном либо избыточном количестве уравнений измеряемых параметров и невырожденных конфигурациях сети КС (геометрических условий, когда матрица  $D_j^T W_{\xi_j} D_j$  имеет обратную). В случае значимого нарушения априорных предположений о векторе  $\Theta_j$  точность оценки (16) может быть низкой.

В случае недоопределенной системы уравнений измерений КС ( $M < 4$ ) оценка (16) является оптимальной и единственной возможной при принятом критерии оптимизации, поскольку в этом случае матрица  $D_j^T W_{\xi_j} D_j$  является вырожденной.

Алгоритмы (16) и (17) не учитывают условия  $p_j^T I = 1$ , поэтому при минимизации медленно изменяющихся погрешностей (с учетом флюктуационной составляющей) для разных спутников могут быть получены разные наборы весов  $p_j$ . Это приведет к дополнительной погрешности оценок координат потребителя, обусловленной неточной синхронизацией часов КС, особенно для сетей протяжен-

ностью 1000 км и более (для них погрешности привязки шкал времени КС к шкалам СРНС декоррелированы). Кардинальное решение данной проблемы заключается в использовании избыточного количества КС в сети и/или использовании на КС дополнительных высокоточных фазовых измерений, которые позволяют оценить расхождения шкал времени КС  $\Delta_{ik} = \Delta_i - \Delta_k$  и повысить точность определения элементов вектора  $\Theta_j$  при совместной обработке кодовых и фазовых измерений [1]. Оценка расхождений шкал времени КС по результатам фазовых измерений с субнаносекундной точностью позволит практически полностью устраниТЬ влияние погрешностей рассинхронизации часов КС в сети на точность дифференциальной коррекции наблюдений потребителей. В этом случае вектор  $\Delta$  может быть представлен как

$$\Delta = \Delta_1 \mathbf{I} + \tau,$$

где  $\Delta_1$  — расхождение шкалы времени главной КС сети относительно системного времени СРНС;  $\tau$  — вектор расхождений шкал времени между  $i$ -й и главной КС.

Тогда вместо параметра  $\alpha_j$  (уход шкалы времени  $j$ -го спутника относительно системного времени СРНС) в сети КС можно оценивать параметр  $\alpha_j^* = \alpha_j + \Delta_1$ , а вектор  $\tau$  определять по результатам избыточных кодовых и фазовых измерений совместно с информационным вектором  $\Theta_j$  [1].

Дифференциальные поправки  $\Pi_j$  сети КС у потребителя согласно (16) и (17) (методы МАВ и МП) могут быть определены как

$$\hat{\Pi}_j = \begin{cases} \mathbf{G}_j^T \Theta_j^{MAB} = \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j + \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \hat{\nabla}_j, \\ \mathbf{G}_j^T \Theta_j^{MP} = \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \hat{\nabla}_j, \end{cases} \quad (18)$$

а векторы весов  $\mathbf{p}_j^T$  определяются выражениями

$$\mathbf{p}_j^T = \begin{cases} \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j + \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \text{для метода МАВ,} \\ \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \text{для метода МП (МНК).} \end{cases} \quad (19)$$

Рассмотрим, как изменятся выражения (18) и (19) с учетом ограничения  $\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1$  в (11).

Для метода МП оценивания вектора  $\Theta_j$  можно показать, что условие  $(\mathbf{p}_j^T)_{MP} \mathbf{I} = 1$  выполняется в общем случае, когда  $M \geq 4$ . Для этого представим матрицу  $\mathbf{D}_j$  в виде (см. (4))

$$\mathbf{D}_j = \| \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j : \mathbf{I} \|$$

и, используя выражение (19), получим

$$\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} =$$

$$= \mathbf{G}_j^T \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \parallel \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j : \mathbf{I} \parallel \\ \hline \mathbf{I}^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \end{array} \right]^{-1} \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \parallel \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j : \mathbf{I} \parallel \\ \hline \mathbf{I}^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \end{array} \right] \mathbf{I} =$$

$$= \mathbf{G}_j^T \left[ \begin{array}{cc} \mathbf{C}_{11}^j & \mathbf{C}_{12}^j \\ \mathbf{C}_{21}^j & \mathbf{C}_{22}^j \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \parallel \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j : \mathbf{I} \parallel \\ \hline \mathbf{I}^T \mathbf{W}_{\xi_j} & \end{array} \right] \mathbf{I}.$$

Здесь  $\mathbf{I}$  — единичный вектор размерности  $M$ ;

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{11}^j &= [\mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j]^{-1} + \\ &+ [\mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j]^{-1} \mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} \mathbf{C}_{22}^j \mathbf{I}^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j \times \\ &\times [\mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j]^{-1}, \\ \mathbf{C}_{12}^j &= [\mathbf{C}_{12}^j]^T = - \mathbf{T}_j^T (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j)^{-1} \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} \mathbf{C}_{22}^j, \end{aligned}$$

$$\mathbf{C}_{22}^j = \left\{ \mathbf{I}^T [\mathbf{W}_{\xi_j} - \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j (\mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j)^{-1} \mathbf{T}_j^T \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I}] \right\}^{-1}. \quad (20)$$

С учетом того, что  $\mathbf{T}_j$  — ортогональная матрица, т. е.  $\mathbf{T}_j \mathbf{T}_j^T = \mathbf{T}_j^T \mathbf{T}_j = \mathbf{E}_j$ , или  $\mathbf{T}_j^{-1} = \mathbf{T}_j^T$ , нетрудно получить:

$$\begin{aligned} (\mathbf{p}_j^T)_{MP} \mathbf{I} &= \\ &= \mathbf{G}_j^T \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{T}_j^T [\mathbf{B}_j \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} - \mathbf{B}_j \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} \mathbf{C}_{22}^j \mathbf{I}^T [\mathbf{W}_{\xi_j} - \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{B}_j \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j}] \mathbf{I}] & \\ \hline \mathbf{C}_{22}^j \mathbf{I}^T [\mathbf{W}_{\xi_j} - \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j \mathbf{B}_j \mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j}] \mathbf{I} & \end{array} \right] \mathbf{I}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{B}_j = (\mathbf{A}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{A}_j)^{-1}$ .

С учетом (20) окончательно получим:

$$(\mathbf{p}_j^T)_{MP} \mathbf{I} = \mathbf{G}_j^T \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{0} & \\ \hline \dots & \\ \hline 1 & \end{array} \right] = 1.$$

Таким образом, при использовании метода МП для оценивания элементов вектора  $\Theta_j$  при  $M \geq 4$  и при невырожденной конфигурации сети КС (т. е.  $\mathbf{D}_j$  — матрица полного ранга) автоматически соблюдаются условие  $(\mathbf{p}_j^T)_{MP} \mathbf{I} = 1$ , и введения дополнительных ограничений на минимизируемую функцию (11) не требуется. Напротив, при использовании метода МАВ

$$\begin{aligned} (\mathbf{p}_j^T)_{MAB} \mathbf{I} &= \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j + \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} = \\ &= \mathbf{G}_j^T [\mathbf{E} + (\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j)^{-1} \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} (\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j)^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} = \\ &= 1 - \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j + \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{K}_{\Theta_j}^{-1} (\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j)^{-1} \mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{I} \neq 1. \end{aligned}$$

Поэтому при использовании метода МАВ оптимизация функции (11) должна обязательно включать ограничение  $\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1$ . Как следует из (6), это

приведет не только к парированию влияния  $\Delta_0$  (см. (8)) или  $\Delta_1$  на точность координатных определений потребителя, но и к полной компенсации в измерениях потребителя частотно-временной составляющей погрешности спутника, так как

$$\mathbf{p}_j^T \alpha_j \mathbf{I} = \alpha_j.$$

Таким образом, оптимизация вектора  $\mathbf{p}_j^T$  должна быть направлена на компенсацию эфемеридных составляющих погрешностей. С учетом этого минимизируемую функцию с использованием метода множителей Лагранжа можно записать в виде

$$\langle \varepsilon_j^2 \rangle = \langle [\mathbf{C}_j^T \Delta \mathbf{e}_j - \mathbf{p}_j^T \hat{\nabla}_j]^2 \rangle + (\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} - 1) \lambda \rightarrow \min_{\mathbf{p}_j}, \quad (21)$$

где вектор  $\mathbf{C}_j$  определен в (5). После безусловной минимизации (21) неизвестный множитель Лагранжа  $\lambda$  находится из уравнения

$$\mathbf{p}_j^T (\lambda) \mathbf{I} = 1. \quad (22)$$

По аналогии с (11) можно получить

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_j^2 \rangle &= \langle [\mathbf{C}_j^T \Delta \mathbf{e}_j - \mathbf{p}_j^T \mathbf{H}_j \Delta \mathbf{e}_j - \mathbf{p}_j^T \xi_j]^2 \rangle + (\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} - 1) \lambda \rightarrow \min_{\mathbf{p}_j}, \\ F_e(\mathbf{p}) &= (\mathbf{C}_j^T - \mathbf{p}_j^T \mathbf{H}_j) \mathbf{K}_{e_j} (\mathbf{C}_j - \mathbf{H}_j^T \mathbf{p}_j) + \mathbf{p}_j^T \mathbf{K}_{\xi_j} \mathbf{p}_j + \\ &\quad + (\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} - 1) \lambda \rightarrow \min_{\mathbf{p}_j}, \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{A}_j \mathbf{T}_j, \quad \dim \mathbf{H}_j = [M] \times [3];$$

$$\mathbf{K}_{e_j} = \langle \Delta \mathbf{e}_j \Delta \mathbf{e}_j^T \rangle = \text{diag}[\sigma_{\Delta r_j}^2, \sigma_{\Delta l_j}^2, \sigma_{\Delta n_j}^2].$$

Минимум функции (23) дает решение

$$\mathbf{p}_j(\lambda) = [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{C}_j - \frac{1}{2} \lambda \mathbf{I}]. \quad (24)$$

Подставив (24) в (22), находим значение  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{2[\mathbf{C}_j^T \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} \mathbf{I} - 1]}{\mathbf{I}^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} \mathbf{I}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} (\mathbf{p}_j^T)_{\text{MAB}} &= \mathbf{C}_j^T \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} - \\ &- \frac{\mathbf{C}_j^T \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} \mathbf{I} - 1}{\mathbf{I}^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} \mathbf{I}} \mathbf{I}^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Нетрудно проверить, что условие  $\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1$  для (25) выполняется.

С учетом обозначений

$$\mathbf{U}_j = \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} =$$

$$= [\mathbf{H}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{H}_j + \mathbf{K}_{e_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{H}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j},$$

$$\dim \mathbf{U}_j = [3] \times [M];$$

$$\mathbf{Q}_j = [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T + \mathbf{K}_{\xi_j}]^{-1} =$$

$$= \mathbf{W}_{\xi_j} - \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{H}_j [\mathbf{H}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{H}_j + \mathbf{K}_{e_j}^{-1}]^{-1} \mathbf{H}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j},$$

$$\dim \mathbf{Q}_j = [M] \times [M];$$

$$\mathbf{V}_j^T = [\mathbf{I}^T \mathbf{Q}_j \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{Q}_j, \quad \dim \mathbf{V}_j = [M]$$

оценка оптимальной дифференциальной поправки для потребителя, полученная по методу МАВ, будет иметь вид

$$(\hat{\Pi}_j)_{\text{MAB}} = (\mathbf{p}_j^T)_{\text{MAB}} \hat{\nabla}_j = \mathbf{C}_j^T \mathbf{U}_j [\mathbf{E} - \mathbf{I} \mathbf{V}_j^T] \hat{\nabla}_j + \mathbf{V}_j^T \hat{\nabla}_j,$$

или, с учетом представления (5),

$$(\hat{\Pi}_j)_{\text{MAB}} = \mathbf{G}_j^T \hat{\Theta}_{\mathbf{B}_j} = \mathbf{G}_j^T \left| \begin{array}{c} \mathbf{U}_j [\mathbf{E} - \mathbf{I} \mathbf{V}_j^T] \\ \dots \\ \mathbf{V}_j^T \end{array} \right| \hat{\nabla}_j. \quad (26)$$

Здесь  $\hat{\Theta}_{\mathbf{B}_j}$  — оптимальная байесова оценка эфемерид и ухода шкалы времени  $j$ -го спутника с учетом ограничения  $\mathbf{p}_j^T \mathbf{I} = 1$ ;  $\dim \Theta_{\mathbf{B}_j} = [4]$ . При этом вектор весов принимает вид:

$$(\mathbf{p}_j^T)_{\text{MAB}} = \mathbf{G}_j^T \left| \begin{array}{c} \mathbf{U}_j [\mathbf{E} - \mathbf{I} \mathbf{V}_j^T] \\ \dots \\ \mathbf{V}_j^T \end{array} \right|. \quad (27)$$

Практический интерес представляет рассмотрение некоторых частных случаев. Можно провести минимизацию (21) без учета веса флюктуационной составляющей  $\xi_j$  (детерминистский подход) для случая  $M \leq 3$ . Тогда дифференциальная поправка примет вид

$$\begin{aligned} (\hat{\Pi}_j)^* &= (\mathbf{p}_j^*) \hat{\nabla}_j = \mathbf{G}_j^T \hat{\Theta}_j^* = \\ &= \mathbf{G}_j^T \left| \begin{array}{c} \mathbf{U}_j^* [\mathbf{E} - \mathbf{I} (\mathbf{V}_j^*)^T] \\ \dots \\ (\mathbf{V}_j^*)^T \end{array} \right| \hat{\nabla}_j, \end{aligned} \quad (28)$$

где

$$\mathbf{U}_j^* = \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T \mathbf{Q}_j^*,$$

$$\mathbf{Q}_j^* = [\mathbf{H}_j \mathbf{K}_{e_j} \mathbf{H}_j^T]^{-1},$$

$$(\mathbf{V}_j^*)^T = [\mathbf{I}^T \mathbf{Q}_j^* \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{Q}_j^*.$$

При  $M = 1$  получим  $\mathbf{E} = 1$ ,  $\mathbf{I} = 1$ ,  $\mathbf{V}_j^* = 1$  и

$$(\hat{\Pi}_j)_{M=1}^* = \mathbf{G}_j^T \left| \begin{array}{c} 1 \\ \dots \\ 0 \end{array} \right| \hat{\nabla}_j = \hat{\nabla}_j.$$

Это показывает, что алгоритм традиционной дифференциальной коррекции по наблюдениям одной КС является частным случаем оптимального алгоритма (26).

Таким образом, на основе геометрического подхода получены отвечающие заданному критерию оптимальные статистические алгоритмы определения дифференциальных поправок к измеряемым потребителем псевдодальнностям по наблюдениям сети КС. Оценки дифференциальных поправок, использующие метод МП (или МНК) обработки наблюдений сети КС, определены соотношениями (18) и (19), а оценки, базирующиеся на байесовском подходе, определены выражениями (26) — (28).

Средние квадратичные погрешности дифференциальной коррекции для конкретных условий навигационных определений (количества КС в сети и класса аппаратно-программных средств КС и АП) могут быть рассчитаны по формуле (29) с использованием выражений (19), (27) и (28).

$$\sqrt{(\varepsilon_j^2)} = \sqrt{\sigma_{\Theta_j}^2 + \langle (\varepsilon_{\text{атм}}^*)^2 \rangle + \sigma_{\eta_j}^2 + \sigma_{\sigma_j}^2}, \quad (29)$$

где  $\sigma_{\Theta_j}^2 = (\mathbf{G}_j^T - \mathbf{p}_j^T \mathbf{D}_j) \mathbf{K}_{\Theta_j} (\mathbf{G}_j^T - \mathbf{p}_j^T \mathbf{D}_j)^T$  — дисперсия остаточной погрешности компенсации эфемеридно-временных погрешностей наблюдений;  $\sigma_{\eta_j}^2 = \mathbf{p}_j^T \mathbf{K}_{\eta_j} \mathbf{p}_j$  — дисперсия дифференциальной коррекции, обусловленная неточной синхронизацией часов КС;  $\sigma_{\delta_j}^2 = \mathbf{p}_j^T \mathbf{K}_{\delta} \mathbf{p}_j$  — дисперсия дифференциальной коррекции из-за флуктуационных погрешностей наблюдений КС. Дисперсия атмосферной составляющей погрешностей дифференциальной коррекции равна:

$$\langle (\varepsilon_{\text{атм}}^*)^2 \rangle = (k_{\text{ион}} \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{\text{ион}})^2 + (k_{\text{тр}} \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{\text{тр}})^2,$$

если осуществляется атмосферная коррекция наблюдений КС в центре обработки сети, а потребитель осуществляет автономную коррекцию своих наблюдений;

$$\langle (\varepsilon_{\text{атм}}^*)^2 \rangle = (k_{\text{ион}} [\Delta_{\Pi_j}^{\text{ион}} - \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{\text{ион}}])^2 + (k_{\text{тр}} [\Delta_j^{\text{тр}} - \mathbf{p}_j^T \Delta_j^{\text{тр}}])^2,$$

если осуществляется атмосферная коррекция у потребителя (в том числе и наблюдений сети КС); при использовании двухчастотных измерений на КС и в АП можно принять  $k_{\text{ион}} = 0$ .

Для сети из четырех или более КС при обработке наблюдений методом МП (или МНК) с оценкой текущих расхождений шкал времени КС по результатам высокоточных фазовых наблюдений

$$\sigma_{\Theta_j}^2 = 0; \sigma_{\eta_j}^2 \approx 0 \quad \text{и} \quad \sigma_{\delta_j}^2 = \mathbf{G}_j^T [\mathbf{D}_j^T \mathbf{W}_{\xi_j} \mathbf{D}_j]^{-1} \mathbf{G}_j.$$

Для оценки атмосферной составляющей погрешностей дифференциальной коррекции могут быть использованы модели высотного профиля показателя преломления тропосферы и ионосферы, рассмотренные в [16, 17].

Предложенный методический подход и алгоритмы обработки координатных наблюдений сети КС нетрудно по аналогии распространить на случай обработки и псевдоскоростных наблюдений. При этом нужно иметь в виду, что эфемеридные составляющие погрешности псевдоскоростных измерений соизмеримы с другими составляющими и значимо меньше, чем, например, составляющая преднамеченнего изменения частоты излучения спутников GPS в режиме SA. Кроме того, для тех КА, которые движутся в слое ионосферы в зоне максимальной электронной концентрации  $H = 200 \dots 600$  км, ионосферная погрешность может существенно превышать другие составляющие (кроме воздействия режима SA GPS), а дифференциальная коррекция ионосферной составляющей погрешности наблюдений высокодинамичных потребителей на высотах  $H < < 150$  км с использованием наблюдений наземной сети КС может, как показывают исследования, не повысить, а даже уменьшить точность навигационных определений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Изложенный анализ и методический подход к реализации спутниковой дифференциальной навигации позволили получить оптимальные алгоритмы обработки наблюдений сетей КС, удовлетворяющие требованию информационной совместимости дифференциальной подсистемы GNSS и массовой серийной аппаратуры потребителей через унифицированные GNSS-форматы, а также определить общие рекомендации по обработке информации и построению сетей КС.

Полученные в работе алгоритмы обработки наблюдений сетей КС базируются на геометрическом подходе, не учитывающем модели движения спутников GPS и ГЛОНАСС. Потенциальные возможности реализации такого подхода с использованием геометрического метода обработки кодовых и фазовых наблюдений сетей КС различной протяженности описаны в [1, 8, 18], а алгоритм определения широкозонных дифференциальных поправок приведен в [7]. Как показано в [1, 8, 18], погрешности (СКО) дифференциальной коррекции сетей КС протяженностью порядка 1000 км (территория Украины), не превысит 1.0—1.5 дм для координат и 0.4 см/с для составляющих вектора скорости потребителя.

бителя при абсолютных определениях, а при относительных определениях СКО погрешности разности дифференциальных коррекций псевдодальнostей составит  $(1-2) \cdot 10^{-8}$  от длины измерительных базисов. При этом погрешности МНК-оценок эфемеридных и частотно-временных параметров навигационных спутников соизмеримы с погрешностями бортовой оперативной информации и отличаются, во-первых, сильной коррелированностью (что обуславливает высокую точность вычисления дифференциальных коррекций псевдодальнostей и псевдоскоростей потребителя), а во-вторых — флюктуационным характером этих погрешностей. Таким образом, применение даже чисто геометрического подхода без использования априорной информации о движении навигационных спутников позволяет удовлетворить современные требования абсолютного большинства потребителей к точности навигационного обеспечения [13]. Геометрическое решение даже большой системы 350—500 уравнений со 100—130 неизвестными, включая расхождения шкал времени и частоты КС является достаточно простым и надежным в реализации [7]. Тем не менее, представляется целесообразным применение даже в региональных сетях КС смешанного орбитально-геометрического подхода, использующего как модели движения спутников (на коротких дугах), так и моделей поведения часов КС, что особенно эффективно при оснащении КС рубидиевыми или цезиевыми стандартами. Использование моделей движения навигационных спутников, моделей поведения часов КС и интервального совместного оценивания эфемеридно-временных параметров спутников и расхождений шкал времени КС сети позволит выполнить эффективную вторичную фильтрацию определений, реализовать адаптивный байесовский подход и повысить информационную надежность дифференциальной подсистемы в целом. Как показано в работе [9], использование моделей движения навигационных спутников при обработке наблюдений от сети станций слежения, размещенной в пределах территории России, позволяет повысить точность определения координатных эфемеридно-временных параметров (по сравнению с геометрическим методом) в 3—4 раза, а скоростных — на два порядка. Это предоставляет возможность расширить зону действия сети КС, т. е. позволит производить высокоточные навигационные определения не только на территории дислокации сети, но и далеко за ее пределами. Наконец, моделирование орбит спутников и поведения часов КС дает возможность повысить надежность разрешения неоднозначности и восстановления скачков («слипов») фазовых наблюдений на больших изме-

рительных базисах, обеспечить достоверную оценку статистических характеристик погрешностей эфемеридно-временных параметров навигационных спутников и повысить надежность и достоверность контроля целостности СРНС.

Очевидно, все перечисленные преимущества введения априорных моделей в обработку наблюдений достигаются ценой существенного ее усложнения и использования дорогостоящей высокопроизводительной вычислительной техники в центрах обработки информации, что для локальных сетей КС может оказаться неприемлемым. При проектировании конкретных сетей КС с заданной областью дислокации, предназначенных для обеспечения дифференциального режима наблюдений заданных классов потребителей (приземные потребители, самолеты, космические аппараты и т. п.), необходимо найти разумный компромисс между геометрическим и орбитальным подходами к обработке наблюдений сети. Для этого можно воспользоваться результатами данной работы и на основе компьютерного моделирования провести сопоставительный анализ точности определения параметров дифференциальной коррекции методами МП (МНК) и МАВ. Одновременно необходимо оценить устойчивость к нарушениям предположений об априорном законе распределения оцениваемых параметров, т. е. определить влияние погрешностей априорных статистических характеристик определяемых параметров на точность дифференциальной коррекции. Это позволит определить целесообразность введения априорных моделей, требуемую точность их задания и степень усложнения алгоритмов обработки наблюдений.

При проектировании сетей КС следует учитывать и следующие общие рекомендации:

- целесообразно использовать в сети однотипные КС, особенно при малых базисах (сети «одного созвездия»), чтобы не осуществлять дополнительную оценку расхождений шкал времени;

- для сетей КС с измерительными базисами более 1000 км необходимо включать в обработку информации фазовые наблюдения для высокоточной синхронизации шкал времени КС и повышения точности эфемеридно-временных определений;

- геометрическая конфигурация сети КС должна по крайней мере исключать возникновение «выбросов» значений геометрического фактора и, вследствие этого, неустойчивого функционирования программного обеспечения обработки наблюдений КС.

Автор выражает признательность профессору Э. Н. Хомякову за полезное обсуждение данной работы, замечания и рекомендации.

1. Верещак А. П., Жалило А. А., Ноздрин И. Г., Флерко С. Н. Потенциальные возможности реализации широкозонной дифференциальной навигации по сигналам спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС в Украине // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 5/6.—С. 95—100.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. — М.: Координационный научно-информационный центр ВКС РФ, 1995.—53 с.
3. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978.—350 с.
4. Планирование глобальной радионавигации // Сб. тр. Второй международной конф. — М., 1997.—Том 1, 2.
5. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. — М.: Сов. радио, 1977.—432 с.
6. Фалькович С. Е., Хомяков Э. Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. — М.: Радио и связь, 1981.—288 с.
7. Флерко С. Н. Алгоритмы оценивания эфемеридно-временных параметров спутников систем GPS и ГЛОНАСС // Информатика: Сб. научн. тр. — Киев: Наук. думка, 1998. Вип. 5.—С. 165—169.
8. Флерко С. Н. Реализация высокоточной спутниковой широкозонной навигации // Информационные системы: Сб. научн. тр. — Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1998.—Вип. 2(10).—С. 72—76.
9. Хомяков Э. Н., Трикоз Д. В., Шаповалов С. Г., Наумова Е. Э. Основные задачи статистической обработки измерительной информации на контрольных станциях глобальной спутниковой радионавигационной системы // Авиационно-космическая техника и технология. Сб. научн. тр.: — Харьков: ХАИ им. Н. Е. Жуковского, 1997.—С. 358—362.
10. Ashkenazi V., Chao C., Chen W. et al. High precision wide area DGPS // Proc. of the 5th International Conf. on DSNS'96, St. Petersburg, Russia, May 20—24, 1996. — St. Petersburg, 1996.—Vol. 1.—paper N 8.
11. Breeuwer E., Moelker D.-J., van Goor S. P., et al. A precision approach to differential GNSS interoperability // Proc. of the 5-th International Conf. on DSNS'96, St. Petersburg, Russia, May 20—24, 1996. — St. Petersburg, 1996.—Vol. 1.—paper N 15.
12. Differential Satellite Navigational System // Proc. of the 5th International Conf. on DSNS'96, St. Petersburg, Russia, May 20—24, 1996.—Vol. 1, 2.
13. Federal Radionavigation Plan 1996 // Department of Transportation and Department of Defense. — OMB N 0704—0188. — USA, 1996.—212 p.
14. Global Navigation Satellite System // Proc. of the 2nd European Symp. on GNSS'98, Toulouse, France, October 23—25, 1998. — Toulouse, 1998.—Vol. 1—3.
15. ICAO GNSS DRAFT SARPS (GNSS standards and recommended practices). — Ver.4.0. — August 28, 1997.
16. Jin X., C. De Jong. Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations // Proc. of the 5th International Conf. on DSNS-96. — St. Petersburg, Russia, May 20—24, 1996. — St. Petersburg, 1996.—Vol. 1.—paper N 34.
17. Okkers R. The applications of multi reference station DGPS correction data enhancing user position accuracy in a wide area // Proc. of the 5-th International Conf. on DSNS'96. — St. Petersburg, Russia, May 20—24, 1996. — St. Petersburg, 1996.—Vol. 2.—poster N 14.
18. Vereshchak A. P., Piskorzh V. V., Zhalilo A. A., et. al. The navigation service concept and the possibilities of realization of GNSS-1 wide area differential subsystem in Ukraine // Proc. of the 2nd European Symp. on GNSS'98. — Toulouse, France, October 23—25, 1998. — Toulouse, 1998.—Vol. 1.—P. 1—5.

**METHODOLOGICAL APPROACH AND ALGORITHMS  
FOR THE REALIZATION OF A DIFFERENTIAL METHOD  
OF SATELLITE NAVIGATION BASED  
ON THE OBSERVATIONS OF REFERENCE STATION  
NETWORK**

A. A. Zhalilo

We propose the methodology of constructing reference station networks for the GPS/GLONASS differential navigation and processing the measurements. Based on the geometrical approach, the optimum algorithms of processing the observations of reference station networks are developed, and recommendations for the creation of regional and local differential GPS/GLONASS subsystems are worked out.

УДК 551.520.32

# Влияние эмиссии радона, предшествующей землетрясению, на параметры нижней ионосферы

Е. В. Мартыш

Інститут космічних досліджень НАН і НКА України

*Надійшла до редакції 05.07.99*

Подається обґрунтування перспективності використання тих фотометричних параметрів нижньої іоносфери, які помітно змінені проникаючими збуреннями електростатичного поля Землі. Запропоновано ряд механізмів для кількох участків спектру в оптичному і близькому ІЧ-діапазонах. Реалізація вказаних моделей передбачає нерівноважне збудження коливань молекулярних компонентів на висотах порядку 100 км. Приведено оцінки інтенсивностей випромінювання для деяких спектральних інтервалів.

В настоящее время можно считать установленным, что при подготовке землетрясений в их эпицентральной зоне происходит [5, 10]: а) выделение различных газов (водород, гелий, радон и др.); б) резкие колебания уровня подземных вод; в) заметное изменение дебита источников геотермальных вод. Кроме того, перед мощным извержением вулканов наблюдаются крупные выбросы аэрозолей с химическим составом в широком диапазоне [6].

В этой работе будут рассмотрены эффекты, связанные в основном с выделением радиоактивных газов и сопутствующим возмущением электростатического поля Земли. Анализ возможного влияния эмиссии метана и других молекулярных газов, например, формирование локального парникового эффекта, требует привлечения более подробных данных наблюдений.

Эмиссия водорода, неоднократно отмечавшаяся рядом авторов [2, 10], представляет несомненный интерес для наземных наблюдений. Так, хорошо известные полупроводниковые сенсоры для водорода могут, из-за их сравнительной дешевизны, размещаться на больших площадях. Кроме того, им-

пульсный характер его выделения со случайной длительностью импульса позволяет построить возможный механизм генерации акусто-гравитационных волн с большой длиной волны [5].

## ФОРМИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Особое положение радона в рассматриваемом ряду заключается в том, что этот газ ( $Rn_{222}$ ) является радиоактивным элементом с коротким периодом полураспада. Те альфа-частицы, которые он излучает, имеют энергию порядка 6 МэВ и создают до  $2 \cdot 10^5$  пар ионов. Суммарный выброс радона перед землетрясением в среднем составляет величину, эквивалентную появлению источника ионизации со скоростью  $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  [7]. Теория изменения проводимости приповерхностного слоя с учетом кинетики положительных и отрицательных ионов была разработана рядом авторов и наиболее подробно изложена в [10].

Она существенным образом опирается на разни-

ци в подвижности отрицательных и положительных ионов, связанную с разным характером их гидратации. При этом представляется достаточным рассматривать только комплексы типа  $M^{(+)}(H_2O)_n$ , где  $M$  — молекулярные ионы, а  $n$  — либо 2—3 для отрицательных ионов, либо 3—6 для положительных [19]. Формированием комплексов с аммиаком, окислами серы и другими веществами, обладающими большим дипольным моментом (1—2 Д), можно пренебречь, так как их концентрации на много порядков меньше концентрации водяного пара. Численный анализ аналогичной ситуации с учетом формирования сложных структур типа  $NO_3^-(HNO_3)_m(H_2O)_n$ , был предпринят в [27]. Ясно, что рекомбинация гидратированных ионов затягивается. Это дает возможность утверждать, что образовавшаяся концентрация зарядов в течение определенного времени остается постоянной. При этом приходится предполагать отсутствие заметного ветра, разрушающего структуру слоя.

Таким образом, система уравнений баланса для положительных и отрицательных ионов  $N_+$ ,  $N_-$  (концентрация электронов пренебрежимо мала из-за больших сечений прилипания) дополняется уравнением Пуассона и граничными условиями:

$$N_+(z=0) = N_-(z=0) = 450 \text{ см}^{-3};$$

$$E_z(z=0) = 1 \text{ В/см}; \quad dE_z/dz(z=0) = 0.$$

Решение этой системы указывает на формирование приповерхностного двойного слоя с концентрациями ионов порядка  $10^4$ — $10^5 \text{ см}^{-3}$ , толщиной около 100 см и амплитудой возмущения электрического поля  $E_z > 3 \text{ В/см}$ . Время релаксации возмущений  $E_z$  к невозмущенным значениям, при периоде эмиссии альфа-частиц около 50 с, составляет приблизительно  $10^2$ — $10^3$  с. Заметим, что аэрозоли с металлическими включениями могут заметно увеличить концентрацию отрицательных ионов. Эти соображения должны быть приняты во внимание при анализе изменений приповерхностного электрического поля при мощных выбросах аэрозоля перед извержением вулканов, масштабных техногенных катастрофах и крупных лесных пожарах [1, 14].

#### ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРУ

Возмущения электрического поля, возникшие в приповерхностном слое, могут проникать в ионосферу, вызывая различные эффекты. Последние могут качественно различаться в зависимости от амплитуды возмущения и высоты. Опираясь на расчеты [3], можно утверждать, что электрическое поле

$10^{-4}$ — $10^{-5}$  В/см способно заметно изменить электронную температуру и концентрацию. Тогда существенным изменениям будет подвержена кинетика ионно-молекулярных реакций с участием электронов. На высотах, меньших 100 км и полях, меньших  $10^{-5}$  В/см, следует ожидать изменения частоты столкновений электронов (без существенного изменения их концентрации). Такое влияние макроскопически скажется на коэффициентах переноса.

Заметим, что наиболее полно задача о проникновении возмущений приповерхностного слоя вдоль оси  $OZ$ , нормальной к нему, освещена в [21]. В основу положено уравнение непрерывности тока с учетом двух типов проводимости. Уравнение для потенциала  $\Phi$  выглядит так:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{\sigma_1} \frac{\partial \sigma_0}{\partial z} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0,$$

где  $\sigma_1$  — проводимость Педерсена вдоль электрического поля,  $\sigma_0$  — проводимость вдоль магнитного поля. Проводимость  $\sigma_1$  является функцией частот столкновений и соответствующих ленгмюровских частот электронов и ионов, а  $\sigma_0$  — только частот столкновений. Заметим, что в некотором диапазоне высот ионосферы реализуется случай, когда электронная частота столкновений меньше соответствующей легмюровской, а ионная — больше. Соотношение между частотами столкновений и ленгмюровскими определяют характер движения плазмы (дрейф, нормальный к полю на больших высотах, где легмюровская частота преобладает, и электрический ток в направлении поля на малых высотах с обратным отношением частот).

Вторым существенным предположением рассматриваемой теории является гауссовский характер поля

$$E_z = E_0 \exp[-d(r/a)^2],$$

где  $d = 4 \ln 10$ ,  $a$  — характерный размер эпицентralной зоны,  $E_0$  — возмущение электрического поля в эпицентре. Зависимость проводимости от высоты аналогична модели [11]. При этом учитывалось, что нижняя граница ионосферы  $z_1$  изменяется в течение суток, а уровень  $z_2$ , где магнитные силовые линии считаются эквипотенциальными, находится на высоте 90 км. Распределение потенциала  $\Phi$  для  $z > z_2$  тогда соответствует  $\Phi$  для  $z = z_2$ . Граничные условия для  $\Phi$  ставятся при  $z = 0$ ,  $z = z_1$  и  $z = z_2$ . Однако полученные в этом приближении абсолютные значения электрического поля в максимуме не превышают  $10^{-6}$  В/см даже для  $a \approx 200$  км и  $E_0 \approx 1$  В/см. Отметим, что в работе [4] был предложен механизм формирования локальных возмущений электрического поля в ионосфере, свя-

занный с конвективным выносом заряженных аэрозолей со средним размером около 4 мкм и концентрацией  $0.1 \text{ см}^{-3}$  на высоту порядка 100 км. «Электрические ячейки», создаваемые такими аэрозолями, имеют средний радиус 1 м и электрическим полем внутри порядка 0.6 В/см. Движение аэрозолей в теплых восходящих потоках вверх приводит к их неравновесной концентрации на высотах порядка 10 км. Охлаждаясь, они становятся центрами конденсации и формируют облака, аналогичные грозовым. Сопутствующее этому процессу электрическое поле в модели Кикучи [20] служит для ускорения более мелких фракций аэрозоля с последующей столкновительной ионизацией.

В настоящее время в [13] предложен механизм «параметрического усиления» электрических процессов ультразвуковой частоты в ионосфере. Он основан на взаимодействии в мезосфере умеренно сильного фронта акустической волны, идущей от поверхности Земли, с каналом сильноионизованной плазмы (метеорный след). При этом могут возникать локальные токи («медленный разряд») в диапазоне альвеновских частот ( $0.1\text{--}1 \text{ с}^{-1}$ ). Это приведет к возбуждению соответствующих альвеновских волн в ионосфере.

Такие модели близки к механизмам, предлагаемым для объяснения распространения высотных разрядов, так называемых «красных духов» и «голубых струй». В них привлекаются быстрые космические частицы, нелинейные волны ионизации в подпороговом электрическом поле [24] и др. Следует заметить, что сложные модели могут содержать ряд параметров, мониторинг которых довольно труден даже при наличии специальной аппаратуры. Однако оценки значений электрического поля в нижней ионосфере существенны при рассмотрении эффектов его воздействия на интересующих нас высотах. Поэтому воспользуемся еще одной простой моделью формирования электрического поля в ионосфере над областью с повышенной проводимостью [9]. Как отмечалось выше, именно такая область формируется над эпицентralьной зоной будущего землетрясения при выбросах радона.

Предположения, в которых работает модель, достаточно общие:

а) электродинамические процессы квазистационарны, так как характерные времена превышают  $10^3$  с,

б) характерный вертикальный размер  $H$  области повышенной проводимости много меньше характерный размер  $a$  эпицентralьной зоны,

в) проводимость изменяется с высотой  $z$  по закону  $\sigma(z) = \sigma_0 \exp(z/H)$ ,  $\sigma_0 \sim 10^{-14} \text{ См}/\text{м}$ .

Фактически это означает, что слой повышенной

проводимости — плоский, с толщиной  $H$ . Тогда электрическое поле вне этого слоя на  $z \approx 60$  км достигает значения  $E \sim 10^{-3}$  В/см, если амплитуда его вблизи поверхности Земли 10 В/см, а выделение радона носит нерегулярный характер. Слой в этом случае похож на пластины случайной толщины, а линии тока и соответствующие линии электрического поля могут иметь области усиления над этим слоем. Другие возможные варианты распределения повышенной проводимости (точечный, полусферический и т. п.) дают значительно меньшие значения электрического поля. Как отмечалось выше (см. [5]), реальная картина выделения радона носит квазикольцевой характер и весьма близка к описываемой модели.

## влияние возмущений ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИОНОСФЕРУ

Одним из основных эффектов, рассмотренных в работе [21], является образование сравнительно тонких слоев металлических ионов на высотах порядка 100 км. Концентрация ионов натрия, калия, железа и других металлов на этих высотах порядка  $100 \text{ см}^{-3}$ . Происхождение этих ионов различно, но можно указать два главных источника — это абляция метеоров и разрушение космического мусора. Под действием проникающего электрического поля образуется неоднородность с характерным размером вдоль земной поверхности порядка радиуса эпицентralьной зоны и концентрацией легких ионов до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . В работе [8] рассмотрено формирование подобных слоев электрическим полем, проникающим в ионосферу сверху, во время развития плазменной конвекции в магнитосфере. Получена оценка электрического поля для этого процесса: около  $5 \cdot 10^{-4}$  В/см. Толщина такой неоднородности достигает 1–2 км, а концентрация металлических ионов превышает  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Формирование этих слоев зависит от сезона и состояния межпланетного магнитного поля. По мнению авторов работы [21], неоднородность, возникающая из-за возмущений геоэлектрического поля, центрирована на высоте 120 км одним из процессов, ее формирующих (педарсеновский дрейф максимален на этой высоте). Кроме того, толщина слоя ионов в этом случае превосходит 10 км. Следует, однако, иметь в виду, что естественный максимум слоя натрия (т. е. существующий в отсутствие возмущений электрического поля) лежит на высоте около 100 км, хотя их концентрация не превышает  $100 \text{ см}^{-3}$ , а толщина — 3 км.

Существенно также, что характер ионосферного

возмущения определяется направлением поля Е. Если электрическое поле направлено от поверхности Земли, то электронная (и ионная) концентрация заметно уменьшается над эпицентральной зоной. Увеличение концентрации должно наблюдаться, когда поле Е направлено вниз.

Для слабоионизированных слоев ионосферы существенным также является эффект нагрева электронного компонента при наличии возмущений электрического поля. Нагрев, естественно, квадратичен по полю и существенно зависит от взаимной ориентации электрического и магнитного поля Земли только для высот более 150 км. Теория этого процесса хорошо известна и наиболее подробно изложена в [16]. Приведем окончательное выражение для электронной температуры  $T_e$ :

$$T_e = T_{e_0} + \frac{e^2 E^2}{m_e \delta \nu_e^2}.$$

Здесь  $T_{e_0}$  — невозмущенное значение электронной температуры,  $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — его масса,  $\sigma = \sigma(T_e)$  — коэффициент аккомодации электрона при его взаимодействии с нейтральными частицами,  $\nu_e = \nu_e(T_e)$  — частота таких столкновений. Это выражение справедливо при доминирующей роли указанных столкновений.

Увеличение электронной температуры до таких значений, когда основная часть аккомодируемой энергии электронов расходуется на возбуждение колебательных степеней свободы молекул, происходит на высотах около 100 км при электрических полях  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  В/см. Эти оценки получены в [3] путем грубых расчетов, с использованием экспериментальных данных для разряда в воздухе. Удельные потери электронов в верхней атмосфере меньше, чем для приземного воздуха. Поэтому эти оценки являются завышенными. Электрические поля в  $(2\text{--}5) \cdot 10^{-5}$  В/см дадут необходимый эффект.

### СЕЙСМОГЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ОПТИЧЕСКОМ И ИК-ДИАПАЗОНЕ

Увеличение концентрации электронов и ионов натрия, повышение электронной температуры дают возможность рассмотреть заметное увеличение скорости образования колебательно-возбужденных молекул азота. Она достигает значений около  $10^4$  квант·см $^{-3}$ с $^{-2}$  и будет доминировать среди остальных ионно-молекулярных процессов. Хотя скорость возбуждения окиси углерода CO при  $T_e > 10^3$  К более чем на три порядка превосходит скорость возбуждения азота, но концентрация CO

составляет менее  $3 \cdot 10^{-5}$  от его концентрации на рассматриваемых высотах.

В этих условиях распределение молекул азота по колебаниям является заметно неравновесным. Температура нижних уровней близка к электронной, а их заселенность заметно выше больцмановской. Так, заселенность третьего колебательного уровня приблизительно в 300 раз выше больцмановской для данных параметров. Зная электронную температуру и принимая во внимание особенности стационарной функции распределения по колебаниям (с учетом ангармонизма), можно оценить количество колебательно-возбужденных молекул на определенном уровне.

Учитывая, что при наличии возмущающего электрического поля в Е-области ионосферы образуется слой с повышенным содержанием ионов натрия, приведем реакцию резонансной передачи колебательного возбуждения азота на первый уровень электронного возбуждения натрия:



где  $\nu$  — номер колебательного уровня азота; Na,  $\text{Na}^*$  — атомы натрия в основном и возбужденном состояниях. Концентрация атомов может быть оценена по известной концентрации ионов из соотношения Саха. Сечение реакции в описываемых здесь условиях порядка  $5 \cdot 10^{-15}$  см $^2$  [25]. Этот механизм использовался также для объяснения аномально долгого свечения метеорных следов [23]. Учитывая тот факт, что время высыпчивания резонансного дублета натрия около  $10^{-8}$  с, можно предположить, что вся энергия, переданная от колебательно-возбужденных молекул атомам натрия, переходит в излучение. Интерес представляет сравнение характеристик излучения со свечением ночного неба в этом спектральном диапазоне из невозмущенной ионосферы. Это свечение связано с другими химическими реакциями и описано в [12]. Его энергетическая характеристика —  $7 \cdot 10^{-11}$  Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Расчет для слоя натрия толщиной 10 км и рассматриваемого механизма резонансной передачи дает величину  $3 \cdot 10^{-10}$  Дж·см $^{-2}$ с $^{-1}$  [18]. Мониторинг свечения ночного неба в указанном спектральном диапазоне может дать информацию о будущей эпицентральной зоне (рис. 1).

Известно, что нижняя ионосфера содержит заметное количество колебательно-возбужденных молекул азота и кислорода даже в спокойном состоянии. Они существенно влияют на ионно-молекулярный состав этой области и ее фотометрические характеристики.

Резкое увеличение плотности колебательно-возбужденных молекул при увеличении электрическо-

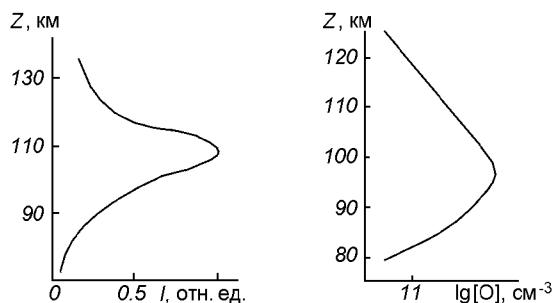
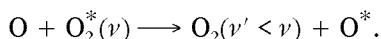


Рис. 1. Высотный профиль ночной интенсивности дублета натрия при возмущении электрического поля

Рис. 2. Распределение атомарного кислорода (расчет и оптические данные [27])

го поля может внести изменения в баланс компонентов нижней ионосферы. Скорость реакции Бейтса—Далгарно велика (около  $10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ ):

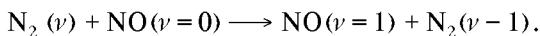


При  $\nu \geq 11$  это механизм дает резкое увеличение количества атомов кислорода в состоянии  ${}^1\text{D}$ . Это состояние является исходным для свечения красной линии  $\lambda = 630$  нм. В спокойном состоянии максимум интенсивности этой линии приходится на область 200—250 км. Учитывая высотное распределение атомов кислорода (рис. 2), можно рассчитывать на перераспределение интенсивности красной линии в условиях сильной колебательной неравновесности на высоте около 100 км.

Следует также отметить возможность влияния неравновесности по колебательным степеням свободы молекул азота в следующей реакции:



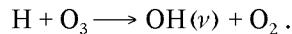
Вычисления показывают, что эта реакция существенна на высотах около 100 км, если составляющая электрического поля, параллельная геомагнитному, порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  В/см. Этот механизм может привести к аномальному увеличению концентрации окиси азота NO в ионосфере над областью эпицентра. В свою очередь, это приведет к увеличению ИК-радиации в спектральной области вблизи  $\lambda = 5.3$  мкм. Кроме того, существенный механизм излучения близ  $\lambda = 5.3$  мкм, связан с колебательным возбуждением окиси азота в реакции интермолекулярного обмена колебаниями [3]:



Эта реакция является достаточно эффективной при упомянутом выше электрическом поле и связанным с ним повышением концентрации NO и уровня колебательного возбуждения азота.

Таким образом, энергия возмущения электрического поля может эффективно преобразовываться в ИК-излучение окиси азота.

Коротко обсудим специальный кинетический механизм свечения гидроксила в ночном небе, предложенный в [15]. Известно, что слой гидроксила формируется на высотах 80—100 км. Реакция, описывающая генерацию колебательно-возбужденного гидроксила, может быть записана в форме



Основные реакции деструкции и дезактивации гидроксила следующие:



Если количество колебательно-возбужденных молекул азота и кислорода аномально велики, тогда выход этих реакций существенно изменится, что повлечет за собою изменения в эмиссии характерной полосы гидроксила.

#### ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Экспериментально зафиксированы слои пылевых частиц толщиной от 1 до 5 км на высотах 80—100 км [17]. Концентрация эти частиц варьирует от 0.5 до 10  $\text{cm}^{-3}$ . К сожалению, современные сведения о происхождении, составе и размерах частиц далеки от полноты. Можно лишь привести оценки, основанные на некоторых экспериментальных данных. На высотах до 80 км пыль состоит в основном из льда, иногда с металлическими включениями. На высотах от 90 км главные компоненты пыли — продукты абляции метеоров, производные от выхлопных газов ракетных двигателей и материалы разрушения остатков космических аппаратов. Их средний размер  $d \sim 1 \text{ мкм}$  или меньше. Заряд таких частиц  $Z_d$  (в среднем) составляет  $10e$  и может быть оценен из соотношения

$$Z_d \sim dT_e / e^2.$$

Если электронная температура увеличивается до 1000—1300 К, то заряд частицы увеличивается приблизительно в десять раз. При этом возможно формирование кластеров из пылевых частиц и, при определенных параметрах, «пылевых кристаллов». Отметим здесь работу [26], где определены параметры локального уменьшения электронной плотности, связанного с зарядкой внезапно увеличившегося количества пылевых частиц (из-за абляции метеоров).

Так как температура нейтралов на рассматриваемых высотах не превышает 150 К, то будем считать, что состояние электронов на поверхности пылевых частиц аналогично их состоянию над поверхностью криогенных жидкостей и кристаллов [22]. В этом случае электроны являются связанными в направлении нормали к поверхности и практически свободны в тангенциальном направлении. Можно показать, что энергия связи электрона в этом случае порядка 0.5—0.9 эВ. Когда ион сталкивается с заряженной пылевой частицей, то при гетерогенной рекомбинации формируются атомы в выделенных возбужденных состояниях. Это связано с особенностью распада квазимолекулы: поверхностный электрон — ион с образованием нейтрального атома. Вероятность такого процесса максимальна, когда энергия связи поверхностного электрона близка к энергии электрона в атоме. Учитывая, что энергия связи поверхностного электрона около 1 эВ, можно утверждать атомы будут образовываться в высоковозбужденных, т. н. ридберговских состояниях.

Интенсивность  $I_{\text{ИК}}$  соответствующего ИК-излучения таких атомов в диапазоне  $\lambda\lambda 2$ —4 мкм можно оценить по формуле

$$I_{\text{ИК}} = E_b a_r n_i Z_d n_d ,$$

где  $E_b$  — энергия связи поверхностного электрона,  $a_r$  — коэффициент гетерогенной рекомбинации,  $n_i$  — концентрация положительных ионов,  $n_d$  — концентрация пылевых частиц. Коэффициент гетерогенной рекомбинации можно оценить так:  $a_r \sim \sigma u n_i w$ , где  $\sigma$  — сечение взаимодействия ион-пылевая частица,  $u$  — скорость положительного иона,  $w$  — вероятность гетерогенной рекомбинации (величина порядка единицы). Используя выше приведенные значения указанных параметров, получим оценку:

$$I_{\text{ИК}} \sim 10^{-18} \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1} .$$

## ВЫВОДЫ

1. Увеличение интенсивности дублета спектральной линии натрия (желтое свечение) в излучении ночного неба следует ожидать при его долгосрочном мониторинге над сейсмоопасными регионами.

2. Другие фотометрические предвестники землетрясений — появляющиеся за несколько часов до события вспышки излучения ночного неба в красной или зеленой части спектра можно связать с эмиссией линий атомарного кислорода (длины волн  $\lambda\lambda = 557.7$  и 630 нм соответственно). Необходимы

более точные оценки ожидаемых интенсивностей указанного излучения.

3. Общая интенсивность излучения компонентов нижней ионосферы в ИК-диапазоне при наличии заметных возмущений электрического поля может, как известно, на 3—5 порядков превосходить интенсивность излучения в оптической части спектра. Количество данных наземных и спутниковых наблюдений, особенно в дальнем ИК- и субмиллиметровом участке спектра еще мало по сравнению с оптическими данными. Это требует привлечения новых механизмов образования указанного излучения и более детальной обработки известных ранее.

Автор благодарен проф. О. К. Черемных за стимулирующие дискуссии.

1. Алексеев В., Алексеева Н. Аэрозольный предвестник извержения Авачинского вулкана в январе 1991 г. // Докл. АН.—1995.—345, № 5.—С. 667—670.
2. Войтов Г. И., Николаев И. О потоке водорода в приземную атмосферу в геодинамически различных геоструктурных зонах // Докл. АН.—1995.—334, № 1.—С. 110—114.
3. Гордиец Б. И. О механизмах ИК-излучения верхней атмосферы // Космич. исследования.—1970.—8, № 3.—С. 437—449.
4. Коладзе Т. Возбуждение электрических полей в верхней атмосфере // Физика атмосферы и океана.—1997.—33, № 5.—С. 640—643.
5. Уткин В. Юрков А. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник ЗТ // Докл. АН.—1998.—358, № 5.—С. 675—680.
6. Alekseev V., Alekseeva N. Investigation of metal transfer in the biosphere during gaseous emission in zones of tectonic activity // Nucl. Geophys.—1992.—6, N 1.—P. 99—110.
7. Alekseev V., Alekseeva N. On relation between fluxes of metals in waters and radon in Turkmen region of seismic activity // Radiat. Measurement.—1995.—25, N 1.—P. 637—639.
8. Bedley D., Welkins B. Seasonal occurrence of thin metallic ion layers at high latitude // GRL.—1997.—23, N 20.—P. 2783—2792.
9. Bliokh P. Variation of electric fields and currents in the low ionosphere over the region of forthcoming EQ // Radio Physics and Radio Astronomy.—1997.—2, N 2.—P. 146—151.
10. Boyarchlik K., Pulinets S., Hegai V. Variability of Earth atmospheric electric field and ion-aerosols kinetics in troposphere // 2-nd Workshop «Solar activity effects on the middle atmosphere». Aug 18—22, 1997, Prague, Czech Rep.
11. Cole R., Pierce E. Electrification in the Earth atmosphere for altitudes 0—100 // J. Geophys. Res.—1965.—70, N 12.—P. 2735—2749.
12. Fishkova L. M. Night radiation of the middle latitude upper Earth atmosphere // Metsniereba, Tbilisi.—1983.—453 p.
13. Galperin Yu., Hayakawa M. On a possibility of parametric amplifier in the strato-mesosphere suggested by MASSA experiment with the AREOL—3 Sat. // J. Geomagn. and Geoelec.—1998.—in press.
14. Gopalakrishnan V., Deshpande C., and Kamra A. Measurements of atmospheric electric field and conductivity in the locality of a gas well flame // GRL.—1996.—23, N 24.—P. 3615—3618.
15. Grigor'eva V., Gershenson Yu., Umanskij S., Kinetic mechanism of night sky hydroxyl afterglow // Khimicheskaya Fizika.—1996.—15, N 5.—P. 101—105.

16. Gurevich A., Shvarzburg A. Non-linear theory of e/m waves propagation in the ionosphere. — Moscow: Nauka publ., 1973.—321 p.
17. Havnes O. Charged Dust in the Earth Mesopause // Physica Scripta.—1992.—45.—P. 535—544.
18. Ivchenko V., Mal'nev V., and Martysh E. Seismogenic e/m radiation in optical and infrared range // Proc. of SPIE.—1997.—3237.—P. 23—26.
19. Kawamoto H., Ogava T. First model of negative ion composition in the troposphere // Planet Spase Sci.—1986.—34, N 12.—P. 1229—1239.
20. Kikuchi H. Environmental and Space electromagnetic. — Tokyo: Springer-Verlag, 1991.
21. Kim V., Hegai V. On possible changes the midlatitude and upper ionosphere before strong EQ // J. EQ Prediction Research.—1997.—6, N 1.—P. 11—23.
22. Kogan E., Mal'nev V., and Martysh E. The electron states on the dielectric surface and heterogenic recombination // III-rd All-union Plasma Chemistry Symp. — 1979.—Vol. 1.—P. 77—80.
23. Levitskij S., Martysh E. Sodium as a possible reason for long afterglow of meteor tails // Astronomicheskij Vestnik // Solar System Research.—1995.—29, N 4.—P. 373—376.
24. Martysh E., Sidorenko V. On the possible mechanism of upward discharge above seismo-active region // Plasma—97, Poland, Contr. Papers.—1997.—Vol. 1.—P. 415—418.
25. Milne L. Sodium atom excitation in the nitrogen afterglow // J. Chem. Phys.—1970.—52, N 10.—P. 53—60.
26. Reid G. Mesospheric aerosols charging and coagulation // GRL.—1997.—24, N 9.—P. 1095—1098.
27. Smirnov V. The ionization in Troposphere. — St.-Pb.: Hidrometeoizdat, 1992.—212 p.

#### THE INFLUENCE OF THE RADON EMISSION PRECEDING EARTHQUAKES ON THE LOWER-IONOSPHERE PARAMETERS

E. V. Martysh

We base the possibility of using the photometric parameters of the lower ionosphere which are noticeably changed by disturbances of the Earth's electrostatic field. A set of models is proposed for the optical and near-infrared parts of spectrum. These models suggest a nonequilibrium excitation of the molecular components at altitudes near 100 km. Radiation intensities for specific spectral ranges are estimated.

УДК 621.317.4:389

## Вимірювання осьового магнітного моменту квадрупольного

Б. В. Дегтярьов

Харківський державний технічний університет радіоелектроніки

*Надійшла до редакції 13.12.99*

На основі мультипольної моделі зовнішнього магнітного поля розроблено метод вимірювання осьового квадрупольного моменту. Метод заснований на використанні чотирьох контрольних точок навколо зовнішнього простору. Досягнуто значне зниження впливу завадонесучих мультиполів вищих порядків.

Точність функціонування магнітних систем орієнтації супутників в цілому визначає його динаміку [1]. Створення необхідних компенсуючих моментів потребує проведення прецизійних вимірювань дипольного моменту супутника. Мультипольний аналіз зовнішнього магнітного поля виявив, що на точність вимірювання дипольних моментів джерела впливають недипольні складові магнітного потенціалу, і в першу чергу — квадрупольна складова, компоненти напруженості якої пропорційні квадрупольним магнітним моментам.

Розглянемо метод вимірювання осьового квадрупольного моменту, напрямок якого сходиться з напрямком поздовжньої осі супутника, яка відстежує в кожний момент часу в поточній точці орбіти напрямок вектора напруженості геомагнітного поля. Метод орієнтовано на використання пасивних первинних перетворювачів (датчиків), і він може бути використаний для вимірювання квадрупольного моменту супутника в цілому та його магнітних елементів і замкнених струмових систем зокрема.

Скалярний магнітний потенціал, що створюється осьовим квадрупольним магнітним моментом, тобто мультиполем нульового порядку квадрупольної постійної складової ЗМП в сферичній системі координат дорівнює [2]

$$U_{20} = \frac{1}{16\pi R^3} g_{20}(1 + 3\cos 2\theta),$$

© В. В. ДЕГТЬЯРОВ, 2000

де  $g_{20} = M_{20}$  — коефіцієнт, що дорівнює осьовому квадрупольному магнітному моменту джерела ЗМП.

За вимірюваним значенням осьового квадрупольного моменту  $g_{20}$  можна досить легко визначити компоненти напруженості мультипола нульового порядку ( $m = 0$ ) квадрупольної складової магнітного поля в довільній точці зовнішнього простору:

$$\begin{aligned} H_{R_{20}} &= -\frac{\partial U_{20}}{\partial R} = \frac{3}{16\pi R^4} g_{20}(1 + 3\cos 2\theta), \\ H_{\varphi_{20}} &= \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial U_{20}}{\partial \varphi} = 0, \\ H_{\theta_{20}} &= -\frac{1}{R} \frac{\partial U_{20}}{\partial \theta} = \frac{3}{8\pi R^4} g_{20} \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту базується на мультипольній моделі ЗМП джерела, що аналітично описується сферичним гармонічним рядом [2]. Згідно з нею магнітне поле джерела в області зовнішнього простору подається у вигляді спектру мультиполів просторових гармонік дипольної, квадрупольної, октупольної та інших складових ЗМП.

Пропонується чотириточковий метод вимірювання осьового квадрупольного моменту і магнітоворівневальний пристрій, що його реалізує. Схему розміщення датчиків пристрою навколо вимірю-

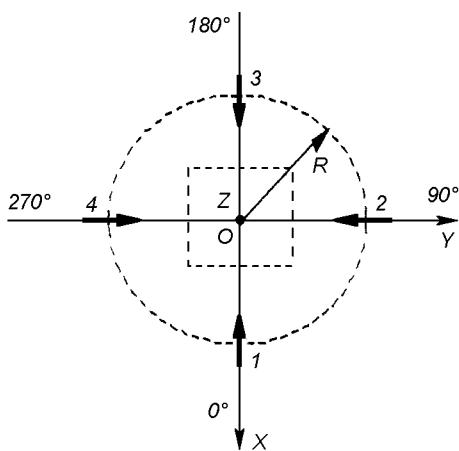


Рис. 1. Схема розміщення датчиків навколо вимірюваного джерела ЗМП. Початок системи координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  суміщено з геометричним центром магнітометричного пристрою і пов'язано з джерелом; стрілками позначені початок і кінець обмоток катушок індукційних датчиків

ваного джерела магнітного поля умовно зображенено на рис. 1. Однокомпонентні магніточутливі датчики 1—4 розташовані в екваторіальній площині ( $\theta = 90^\circ$ ) навколо джерела ЗМП в точках з координатами: 1 ( $R, \varphi = 0^\circ, \theta = 90^\circ$ ), 2 ( $R, \varphi = 90^\circ, \theta = 90^\circ$ ), 3 ( $R, \varphi = 180^\circ, \theta = 90^\circ$ ), 4 ( $R, \varphi = 270^\circ, \theta = 90^\circ$ ).

Відносно вимірюваного квадрупольного поля, яке пропорційне  $g_{20}$ , катушки чотирьох датчиків з'єднані електрично послідовно узгоджено. Тому корисні електричні сигнали, які наведені в цих катушках мультиполем нульового порядку квадрупольної складової вимірюваного магнітного поля, додаються. Відносно магнітного поля зовнішньої нестационарної електромагнітної завади катушки датчиків 1 і 3 та 2 і 4 увімкнені зустрічно, внаслідок чого електричні сигнали, наведені в них завадонесучим магнітним полем зовнішніх джерел, віднімаються, і вимірювальний канал пристрою стає захищеним від зовнішньої електромагнітної завади.

Магнітні осі катушок датчиків 1—4 розташовані радіально, тому на них впливає тільки радіальна складова напруженості ЗМП джерела, що математично подається сферичним гармонічним рядом у вигляді суми мультиполів просторових гармонік  $n$ -го порядку [2]

$$H_R = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta). \quad (2)$$

Тут  $R, \varphi, \theta$  — сферичні координати;  $g_{nm}, h_{nm}$  —

постійні коефіцієнти, що дорівнюють мультипольним магнітним моментам  $m$ -го порядку просторової гармоніки  $n$ -го порядку;  $P_n^m(\cos \theta)$  — приєднані поліноми Лежандра;  $n$  — порядковий номер просторової гармоніки;  $m$  — порядковий номер мультиполю гармоніки  $n$ -го порядку.

Радіальна складова напруженості магнітного поля гармоніки порядку  $n$  зі збільшенням відстані  $R$  від початку координат зменшується тим скоріше, що більший номер просторової гармоніки. Тому для аналізу чотириточкового методу вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту просторової гармоніки ЗМП другого порядку достатньо обмежити сферичний гармонічний ряд (2) членами до  $n = 3$ :

$$\begin{aligned} H_R = & \frac{1}{2\pi R^3} [g_{10} \cos \theta + (g_{11} \cos \varphi + h_{11} \sin \varphi) \sin \theta] + \\ & + \frac{3}{8\pi R^4} \left[ \frac{1}{2} g_{20} (1 + 3 \cos 2\theta) + \right. \\ & + 3(g_{21} \cos \varphi + h_{21} \sin \varphi) \sin 2\theta + \\ & \left. + 3(g_{22} \cos 2\varphi + h_{22} \sin 2\varphi) (1 - \cos 2\theta) \right] + \\ & + \frac{1}{4\pi R^5} \left[ \frac{1}{2} g_{30} (3 \cos \theta + 5 \cos 3\theta) + \right. \\ & + \frac{3}{2} (g_{31} \cos \varphi + h_{31} \sin \varphi) (\sin \theta + 5 \sin 3\theta) + \\ & + 15(g_{32} \cos 2\varphi + h_{32} \sin 2\varphi) (\cos \theta - \cos 3\theta) + \\ & \left. + 15(g_{33} \cos 3\varphi + h_{33} \sin 3\varphi) (3 \sin \theta - \sin 3\theta) \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

Радіальні компоненти  $H_i$  напруженості ЗМП, що діють на магнітні осі катушок, дорівнюють:

— для катушки 1x датчика 1

$$\begin{aligned} H_1 = & \frac{1}{2\pi R^3} g_{11} + \frac{3}{4\pi R^4} \left( -\frac{1}{2} g_{20} + 3g_{22} \right) + \\ & + \frac{3}{\pi R^5} \left( -\frac{1}{2} g_{31} + 5g_{33} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

— для катушки 2y датчика 2

$$\begin{aligned} H_2 = & \frac{1}{2\pi R^3} h_{11} + \frac{3}{4\pi R^4} \left( -\frac{1}{2} g_{20} - 3g_{22} \right) + \\ & + \frac{3}{\pi R^5} \left( -\frac{1}{2} h_{31} - 5h_{33} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

— для катушки 3x датчика 3

$$H_3 = -\frac{1}{2\pi R^3} g_{11} + \frac{3}{4\pi R^4} \left( -\frac{1}{2} g_{20} + 3g_{22} \right) +$$

$$+ \frac{3}{\pi R^5} \left( \frac{1}{2} g_{31} - 5g_{33} \right) \quad (6)$$

— для котушки 4у датчика 4

$$H_4 = - \frac{1}{2\pi R^3} h_{11} + \frac{3}{4\pi R^4} \left( -\frac{1}{2} g_{20} - 3g_{22} \right) + \\ + \frac{3}{\pi R^5} \left( \frac{1}{2} h_{31} + 5h_{33} \right). \quad (7)$$

Розв'язок системи з чотирьох рівнянь (5)–(7) відносно мультиполя нульового порядку ( $m = 0$ ) квадрупольної складової магнітного поля ( $n = 2$ ) дає:

$$\sum_{i=1}^4 H_i = - \frac{1}{4\pi R^4} \cdot 6g_{20}. \quad (8)$$

Електричний сигнал, що збуджується в котушках датчиків 1–4 вимірюванням магнітним полем, дорівнює:

$$E_{20} = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_i = - \frac{1}{k_f} \frac{6g_{20}}{R^4} = - E_{20}^{(2)}, \quad (9)$$

де  $k_f$ , мЕ/мВ — постійна датчика до напруженості магнітного поля;  $E_{20}^{(2)}$  — корисний сигнал, пропорційний  $g_{20}$ . За виміряним електричним сигналом  $E_{20}^{(2)}$  (9) визначається величина осьового квадрупольного магнітного моменту:

$$g_{20} = M_{20} = \frac{1}{6} E_{20} k_f R^4,$$

і, в кінцевому рахунку, компоненти напруженості магнітного поля в довільній точці зовнішнього простору (1), що створюються мультиполем нульового порядку квадрупольної складової ЗМП.

Чутливість вимірювального каналу пристрою до напруженості магнітного поля, згідно з (9) дорівнює  $S_{20} = 6/k_f$ . З виразу (9) видно, що в результативному сигналі  $E_{20}$  відсутні завади, що обумовлені мультиполем просторових гармонік непарного порядку. Тому на точність вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту впливають тільки мультиполем просторових гармонік вищих парних порядків вимірюваного ЗМП, і насамперед четвертого і шостого, які є завадами і спричиняють мультипольну складову методичної похибки.

Електричний сигнал завади, що створюється гармонікою ЗМП четвертого порядку, визначається таким чином:

$$E_{20}^{(4)} = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_i^{(4)}, \quad (10)$$

де  $H_i^{(4)}$  — радіальна складова напруженості магнітного поля завадонесучої просторової гармоніки по-

рядку  $n = 4$ , яка згідно з (2) в екваторіальній площині описується аналітичним виразом

$$H_{\theta=90^\circ}^{(4)} = \frac{15}{4\pi R^6} \left[ \frac{1}{8} g_{40} - \frac{5}{2} (g_{42}\cos 2\varphi + h_{42}\sin 2\varphi) + \right. \\ \left. + 35(g_{44}\cos 4\varphi + h_{44}\sin 4\varphi) \right]. \quad (11)$$

Підставляючи значення радіальної складової напруженості магнітного поля (11) з урахуванням координат точок розміщення датчиків в (10), отримаємо електричний сигнал завад від гармонік четвертого порядку:

$$E_{20}^{(4)} = \frac{60}{k_f R^6} \left( \frac{1}{8} g_{40} + 35g_{44} \right).$$

Радіальна складова напруженості магнітного поля гармоніки шостого порядку:

$$H_{\theta=90^\circ}^{(6)} = \frac{35}{4\pi R^8} \left[ -\frac{1}{16} g_{60} + \frac{21}{8} (g_{62}\cos 2\varphi + h_{62}\sin 2\varphi) - \right. \\ \left. - \frac{189}{2} (g_{64}\cos 4\varphi + h_{64}\sin 4\varphi) + \right. \\ \left. + 2079(g_{66}\cos 6\varphi + h_{66}\sin 6\varphi) \right]$$

наводить в котушках вимірювального каналу пристрою електричний сигнал завади, який визначається виразом

$$E_{20}^{(6)} = - \frac{70}{k_f R^8} \left( \frac{1}{8} g_{60} + 189g_{64} \right).$$

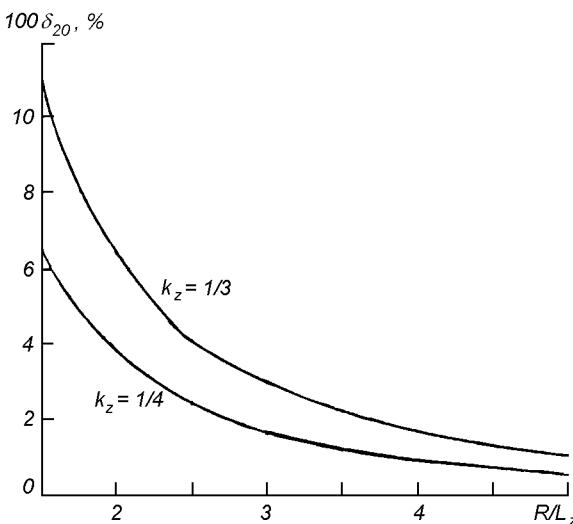
Мультипольна складова методичної похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту через наявність у вимірюваному результуючому електричному сигналі  $E_{20}$  сигналів завад  $E_{20}^{(4)}$ ,  $E_{20}^{(6)}$  буде дорівнювати

$$\delta_{20}^{(4)} = \frac{E_{20}^{(4)}}{E_{20}^{(2)}} = - \frac{5}{4} \frac{g_{40} + 280g_{44}}{R^2 g_{20}}, \\ \delta_{20}^{(6)} = \frac{E_{20}^{(6)}}{E_{20}^{(2)}} = \frac{35}{24} \frac{g_{60} + 1512g_{64}}{R^4 g_{20}}. \quad (12)$$

Оцінимо ці похибки для зразкового осьового квадрупольного магнітного моменту для моделі диполя і антидиполя, які орієнтовані по осі  $Z$  і віддалені від початку координат на  $\pm z_0$ .

Для такого джерела магнітні моменти мультиполів просторових гармонік  $n = 2, 4, 6$  будуть дорівнювати:

$$g_{20} = 4M_z z_0, \quad g_{40} = 8M_z z_0^3, \quad g_{44} = 0, \\ g_{60} = 12M_z z_0^5, \quad g_{64} = 0.$$

Рис. 2. Графічні залежності  $\delta_{20}$  від  $R/L_z$ 

Підставимо ці значення в (12) і отримаємо мультипольну похибку від завадонесучих гармонік порядку  $n = 4, 6$ :

$$\delta_{20}^{(4)} = -\frac{5}{2} \left( \frac{k_z}{R/L_z} \right)^2,$$

$$\delta_{20}^{(6)} = \frac{35}{8} \left( \frac{k_z}{R/L_z} \right)^4,$$

де  $k_z = z_0/L_z \leq 1/2$ ,  $L_z$  — габаритний розмір джерела ЗМП на координатному напрямку  $Z$ .

Результатуюча мультипольна складова методичної похибки магнітного моменту дорівнює

$$\delta_{20} = \delta_{20}^{(4)} + \delta_{20}^{(6)} = \frac{5}{2} \left( \frac{k_z}{R/L_z} \right)^2 \left[ -1 + \frac{7}{4} \left( \frac{k_z}{R/L_z} \right)^2 \right].$$

На рис. 2 зображені графічні залежності  $\delta_{20}$  від  $R/L_z$  для  $k_z = 1/3, 1/4$ . На відстані  $2.5L_z$  похибка  $\delta_{20}$  при  $k_z \leq 1/3$  не перевищує 4 %.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено чотириточковий метод вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту різноманітних джерел ЗМП, що дозволяє визначити рівень напруженості квадрупольного поля в зонах зовнішнього простору;

2. Досягнуто суттєве підвищення точності вимірювання шляхом зниження впливу завадонесучих мультиполів непарного порядку вимірюваного ЗМП;

3. Визначено методичну мультипольну похибку, що дозволяє зробити оптимальний вибір контрольної відстані, на якій розміщаються первинні переворювачі.

1. Сарычев В. А., Овчинников М. Ю. Магнитные системы ориентации искусственных спутников Земли // Итоги науки и техники / ВИНИТИ. Исследование космического пространства.—1985.—23.—104 с.

2. Яновский Б. М. Земной магнетизм.—Л.: ЛГУ, 1978.—592 с.

## THE MEASUREMENT OF THE AXIAL QUADRUPOLE MAGNETIC MOMENT

V. V. Degtyaryov

Using the multipole model of the external magnetic field, we developed a method for the measurement of the axial quadrupole moment. The method is based on the use of four control points in the ambient space. A large decrease of the influence of noise-bearing high-order multipoles was achieved.

УДК 536.5:629.78

# Проблемы терmostатирования и обеспечения сохранности космического аппарата в период предстартовой подготовки и при выведении на орбиту

В. И. Тимошенко<sup>1</sup>, А. В. Агарков<sup>2</sup>, Ю. И. Мошненко<sup>2</sup>,  
В. Н. Сиренко<sup>2</sup>, Ю. В. Кнышенко<sup>1</sup>, Ю. Г. Ляшенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут технічної механіки НАН України та НКА України, Дніпропетровськ

<sup>2</sup>Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

*Надійшла до редакції 22.03.00*

Розглядаються проблеми терmostатування та забезпечення збереження космічного апарату в період передстартової підготовки і під час польоту ракети-носія на активній ділянці траекторії при виведенні на орбіту. Проведено аналіз стану і напрямків розвитку систем терmostатування (СТС) відсіків КА у відповідності до сучасних вимог. Запропоновано модульний принцип створення СТС. Приведено характеристику експериментального та розрахункового забезпечення проектування, створення та відпрацювання сучасних СТС.

## ТРЕБОВАНИЯ К СОВРЕМЕННЫМ СИСТЕМАМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В настоящее время для космической отрасли Украины актуальным является обеспечение конкурентоспособности космических ракетных комплексов (КРК) с использованием ракет-носителей (РН) «Зенит», «Циклон» и «Днепр» на мировом рынке космических услуг. Данные РН рассматриваются сейчас как потенциальные носители для создания и выполнения спутниковых систем по национальным программам Украины, Российской Федерации и некоторых зарубежных фирм [2].

Одной из важнейших задач является обеспечение сохранности и работоспособности космического аппарата (КА) на всех этапах его выведения в космос: при транспортировке из монтажно-испытательного комплекса до стартовой площадки, при подготовке к старту и во время полета РН на активном

участке траектории. Составной частью этой проблемы является создание комфортных температурных условий для КА. Во всех случаях сохранность КА обеспечивается ограждением от воздействия на него тепловых и газодинамических нагрузок с помощью головного обтекателя (ГО) отсека КА. Кроме того в наземных условиях температурный режим в отсеке КА поддерживается с помощью системы терmostатирования (СТС), осуществляющей принудительную вентиляцию в отсеке.

Опыт коммерческого использования РН «Зенит» и «Циклон» показал, что в связи с требованием создания более комфортных условий для современных КА возникали задачи по доработкам и модернизации штатных СТС. Все более активное использование РН «Зенит» в рамках коммерческих проектов, модернизация РН «Циклон» в части увеличения размеров отсека КА, создание КРК «Днепр» на основе боевого ракетного комплекса, не имеющего

автономной СТС головного отсека, обуславливают актуальность нового подхода к проблемам модернизации и разработки систем термостатирования.

Анализ конструктивных особенностей существующих отсеков КА показывает, что эти системы разрабатывались для работы с герметичными аппаратами, когда в отсеке осуществляется только контроль температурно-влажностного режима. Термостатирующий воздух в отсеки КА подается через щелевые газоводы, формирующие интенсивные пристенные струи, скорость которых на выходе из щелевых коллекторов достигает 12–16 м/с. Основная масса воздуха движется в пристенных струях мимо КА, затем разворачивается в месте соударения струй и движется вдоль корпуса ГО к выходным отверстиям на его конической части. Вблизи поверхностей КА создаются значительные застойные области, в которых практически отсутствует скорость движения воздуха. В этих условиях коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхности КА имеют значения на уровне естественной конвекции ( $3\text{--}5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\text{K}^{-1}$ ), и задача стабилизации температуры КА осуществляется за счет увеличения подачи термостатирующего воздуха в отсек и теплосъема пристенными струями. В то же время поверхности узлов КА, находящиеся в зоне пристенных струй, могут подвергаться значительному газодинамическому воздействию термостатирующего воздуха ( $V > 3\text{--}4 \text{ м/с}$ ).

Работоспособность современных негерметичных КА, изготавливаемых из материалов с невысокими механическими характеристиками, в значительной степени будет зависеть от интенсивности воздействия на него окружающей среды в отсеке. Поэтому в отсеке должны обеспечиваться комфортные условия для КА: низкий уровень теплового и газодинамического воздействия на КА за счет снижения в 1.5–2 раза теплопотоков на КА по сравнению с существующими нормами при одновременном ограничении скорости термостатирующего воздуха вблизи поверхности КА до 1.5–2 м/с; должны выполняться повышенные требования к чистоте пространства отсека (например, на уровне федерального стандарта США Fed Std 209E).

При полете РН на активном участке траектории (АУТ) через выходные люки СТС осуществляется сброс избыточного давления воздуха из отсека КА в окружающее пространство (дренирование). При изменении угла атаки или изменении скоростного режима при числах Маха  $M \approx 1$  возможно резкое изменение избыточного давления на поверхности отсека КА. При отсутствии обратных клапанов на выходных люках СТС возможно втекание воздуха из окружающей среды в отсек КА. Перед отделени-

ем КА от РН к моменту сбрасывания головного обтекателя за счет дренирования воздуха должно быть обеспечено выравнивание давления в отсеке с давлением в окружающем пространстве. В противном случае чрезмерная разность давлений приведет к воздействию существенных газодинамических нагрузок на КА в момент сбрасывания обтекателя.

На основе анализа конструктивных особенностей вновь разрабатываемых систем термостатирования и дренирования отсеков КА должны быть сформулированы новые требования к характеристикам данных систем.

Ранее требования к СТС определяли технические условия на параметры термостатирующего воздуха — пределы изменения температуры и влажности воздуха, объемный расход воздуха, избыточные давления в отсеке КА в режиме наземного термостатирования и в момент сброса ГО. Новые, современные требования к СТС состоят в дополнительном нормировании следующих характеристик работы СТС: уровень средних коэффициентов теплообмена при обдуве КА общей системой термостатирования; уровень средних скоростей движения термостатирующего воздуха вблизи поверхностей КА; чистота пространства отсека КА на уровне международных стандартов; уровень средних коэффициентов теплообмена и скорости воздуха для устройств локального обдува теплонапряженных узлов КА.

Дополнительные требования к СТС могут быть удовлетворены следующими конструктивными усовершенствованиями существующих СТС: установкой дополнительных подводящих патрубков, что позволит при необходимости увеличить кратность воздухообмена в отсеке КА; установкой обратных клапанов на выходных люках СТС и мембранных фильтров на перегородках между отсеком КА и приборным отсеком (ПО); установкой автономных устройств локального обдува теплонапряженных элементов КА; установкой решеток, перфорированных экранов, панелей, обеспечивающих более равномерный обдув КА.

## МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Современные требования к параметрам работы СТС требуют нового подхода к созданию или модернизации СТС. В первую очередь необходимо учитывать, что отсек полезной нагрузки РН, отсек КА, должен позволять размещать в нем различные типы КА. При этом изменение полезной нагрузки может быть обеспечено минимальными доработка-

ми отсека КА, в том числе и системы термостатирования. Таким образом, необходимо создание СТС универсального типа, позволяющего производить перенастройку отсека полезной нагрузки с целью выполнения комфортных условий с учетом разнообразия КА.

Оптимальным является модульный принцип конструктивного построения системы термостатирования, заключающийся в создании системы из отдельных модулей. Это упрощает общий монтаж различных вариантов системы и облегчает настройку и эксплуатацию. Каждый модуль СТС должен представлять собой унифицированный взаимозаменяемый узел, выполняющий самостоятельную функцию при различных вариантах компоновки СТС.

Системы термостатирования могут быть разбиты на следующие модули:

- модули раздачи воздуха (газоводы, коллектора, трубопроводы);
- модули бокового обдува КА (перфорированные экраны, сопловые блоки, экранирующие пластины);
- модули торцевого обдува КА (душирующие экраны, сопла, отражающие устройства);
- модули локального обдува узлов КА (сопловые блоки).

Все модули должны иметь унифицированные стыковочные узлы с быстроразъемными соединениями.

Базовые конструктивные элементы (входные и раздающие патрубки, перфорированные экраны, выходные устройства и др., для данного типа РН остаются неизменными при использовании различных КА. Дополнительные сменные элементы (душирующие патрубки, сопловые устройства, направляющие экраны и др.) учитывают особенности конкретных КА.

Разработку модульной конструкции СТС оптимальной массы необходимо выполнять с учетом условия ее одноразового применения. Это позволит использовать для изготовления сменных конструктивных элементов СТС легкие неметаллические материалы, пластмассы.

Средние коэффициенты конвективной теплоотдачи поверхности КА можно также увеличить за счет повышения равномерности обтекания конструкции КА, уровня турбулентности потока, увеличения его скорости. Для отсеков КА кратность воздухообмена при термостатировании со средней степенью заполнения объема отсеков изменяется от 35 до 140. Одним из основных условий модернизации существующих СТС является обеспечение кратности воздухообмена на уровне 120—140.

## МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И РАСЧЕТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОТРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Задача выбора основных конструктивных параметров на всех этапах проектирования, модернизации и опытной отработки СТС представляет собой комплекс расчетно-экспериментальных исследований. В настоящее время основным методом отработки СТС в наземных условиях является проведение испытаний всего комплекса воздухоснабжения РН на натурном опытном образце, включая и отдельные автономные элементы системы термостатирования. Достоверность получаемой при этом информации о режимах работы СТС в наземных условиях достаточно высока. Однако подготовка и проведение таких испытаний требуют значительных временных и материальных затрат, даже при условии использования для этих целей всей материальной части или отдельных ее узлов после проведения других, например, неразрушающих прочностных испытаний. Кроме того, эти испытания СТС могут проводиться только на поздней стадии проектирования, когда уже разработаны и изготовлены отдельные элементы РН.

Сокращение сроков и стоимости отработки СТС и ее отдельных элементов в наземных условиях может быть достигнуто проведением аналогичных испытаний на модельных (макетных) установках, выполненных с соблюдением критериев подобия. Результаты таких испытаний, при наличии соответствующей экспериментальной базы, могут быть получены на ранних стадиях проектирования (модернизации) СТС и учтены на дальнейших этапах разработки.

Общая методология расчетно-экспериментальных исследований для обеспечения выбора основных конструктивных параметров на всех этапах проектирования, создания и опытной отработки СТС РН и КА в наземных предстартовых условиях предусматривает проведение следующих работ:

- анализ конструктивных особенностей термостатируемых отсеков как проточных каналов со сложным продольным и поперечным профилем и диапазонов изменения гидравлических и термодинамических параметров термостатирующего воздуха внутри отсеков (скоростей, сопротивлений, избыточных давлений, температур);
- формулировка упрощенных математических моделей с использованием их для предварительной оценки основных параметров процесса термостатирования, для подготовки рекомендаций по выбору параметров узлов экспериментальной установки;

для формулировки предложений по методике проведения эксперимента в части определения подлежащих измерению параметров, для выбора мест размещения датчиков, для определения предполагаемых диапазонов изменения измеряемых параметров и выбора аппаратуры;

- проектирование, создание или модернизация существующей экспериментальной установки, наладка установки;
- отработка методики эксперимента, проведение предварительных экспериментальных исследований;
- проверка основных расчетных результатов экспериментальным путем в лабораторных условиях на макетных образцах отдельных блоков или полномасштабных отсеков, которая позволит: выбрать значения недостающих параметров, уточнить отдельные эмпирические коэффициенты по блокам и их взаимному влиянию друг на друга, определить скорости течения в различных сечениях проточной части, в том числе вблизи наиболее ответственных приборов;
- проведение параметрических расчетов по уточненным математическим моделям и экспериментальных исследований для некоторых характерных значений определяющих параметров;
- экспериментально-расчетное определение гидравлических характеристик проточных трактов и параметров теплообмена термостатируемых отсеков и отдельных элементов и приборов;
- сопоставление полученных результатов с данными опытной отработки образцов СТС РН и КА ближайших прототипов;
- формулировка рекомендаций по выбору и средствам обеспечения проектных параметров модернизуемых и вновь разрабатываемых СТС и их составных частей в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми современными КА;
- проведение испытаний натурных узлов СТС, предназначенных для установки на штатные изделия, в лабораторных условиях с целью выявления влияния технологических особенностей изготовления на рабочие параметры узлов;
- отработка в лабораторных условиях методики и средств измерения для проведения в особо ответственных случаях натурных испытаний всей системы в целом.

Специфика отработки СТС для наземных предстартовых условий состоит в том, что основным методом исследований является эксперимент, а методы математического моделирования, ввиду сложности гидродинамических и тепловых процессов в СТС, могут быть использованы для проведения предварительных расчетных оценок, выбора и обос-

нования критериев подобия, анализа и интерпретации данных экспериментальных исследований.

Для получения информации об изменении гидродинамических и теплофизических параметров в отсеках КА при полете РН на АУТ необходимы постановка и решение следующих задач:

- исследование поведения проточных трактов СТС при полете на АУТ (дренирование), что имеет важное значение для обеспечения сохранности и последующей работоспособности выводимых КА;
- определение внешних траекторных параметров на АУТ (скорость полета, угол атаки, давление, плотность и температура окружающей среды) с использованием параметров задаваемой траектории или траекторных измерений при запуске аналогичных систем;
- экспериментальное определение гидравлических характеристик входных и выходных устройств СТС (используются методики экспериментов при наземной отработке СТС с моделированием траекторных параметров);
- определение распределений газодинамических параметров по поверхности РН в окрестности выходных отверстий СТС с использованием современных методов численного моделирования пространственного обтекания летательных аппаратов на до- и сверхзвуковых режимах движения;
- совместное решение задач внутренних течений в проточных трактах СТС и внешнего обтекания РН;
- формулировка рекомендаций по выбору конструктивных параметров СТС, обеспечивающих поддержание в отсеках гидравлических и теплофизических параметров в заданных диапазонах на всем участке полета.

Особенность исследований вопросов дренирования отсеков РН при полете на АУТ состоит в том, что в основном при этом используется математическое моделирование. Для решения этих задач по инициативе и в обеспечение разработок ГКБ «Южное» в ИТМ НАНУ и НКАУ была создана соответствующая расчетно-экспериментальная база.

При реализации указанного выше комплекса экспериментальных задач, связанных с разработкой и модернизацией в ГКБ «Южное» СТС РН «Зенит», в ИТМ НАНУ и НКАУ разработан и создан стенд, позволяющий проводить исследование на полномасштабных макетах с расходами воздуха, соответствующими натурным условиям. Этот стенд позволяет определять газодинамические параметры общей системы термостатирования. В состав стендса входят также экспериментальные установки, предназначенные для отработки отдельных натурных элементов и узлов СТС (установка для определения или подтверждения проектных параметров си-

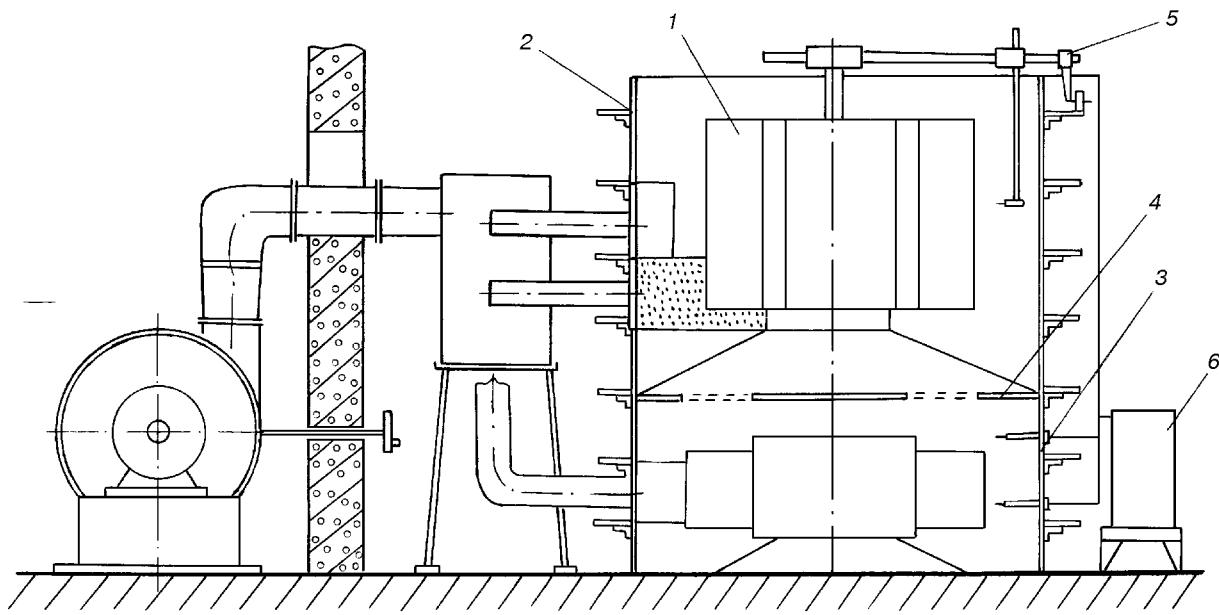


Рис. 1. Схема стенда с полноразмерными макетами КА и секций обтекателя: 1 — полноразмерный макет КА, 2 — полноразмерный макет секции обтекателя, 3 — полноразмерный макет приборного отсека, 4 — экран с мембранными фильтрами, 5 — координатник, 6 — термоанемометрическая система

стемы локального обдува отдельных элементов КА; установка для определения тепловых режимов теплонапряженных элементов РН и КА; установка для исследования гидравлических характеристик узлов и элементов системы терmostатирования отсеков РН и др.).

Для решения задач, связанных с обеспечением сохранности и работоспособности КА на этапе выведения (на АУТ) в ИТМ НАНУ и НКАУ разработаны расчетные методики и соответствующее программное обеспечение, позволяющее в сочетании с использованием экспериментальных данных оперативно и в полном объеме решать все задачи, связанные с отработкой СТС при полете на АУТ. Ниже приводится описание этого научно-методического обеспечения проектной проработки СТС.

#### СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Схема стенда с полноразмерными макетами секции обтекателя РН, КА и приборного отсека РН показана на рис. 1. Подача воздуха осуществляется от вентиляционной установки с расходом воздуха до 20 тыс.  $\text{нм}^3/\text{ч}$ . Режим подачи термостатирующего воздуха может изменяться в широком диапазоне.

Подача воздуха в секцию обтекателя и в приборный отсек РН может осуществляться одновременно в оба отсека или отдельно в один из отсеков за счет перекрытия подачи воздуха заслонками. Комплектация стенда макетами космических аппаратов и приборов может быть разнообразной, в зависимости от типа исследуемого объекта.

Замер скоростей воздуха на стенде в окрестности КА под обтекателем или в окрестности приборов в приборном отсеке может производиться либо последовательно с помощью одного термоанемометрического датчика, расположенного на координатном устройстве, либо одновременно в нескольких точках с помощью многоканальной автоматизированной системы термоанемометрических измерений (АСТИ) [4].

Система АСТИ позволяет снимать информацию о скорости потока воздуха (от 0.5 до 100 м/с) и степени его турбулентности. Общее количество подключаемых датчиков — 80. Предусмотрена последовательная коммутация датчиков в автоматическом режиме с частотой опроса 0.1 Гц, а также ручное выборочное подключение любого датчика с цифровой индикацией номера замеряемой точки и величины скорости в этой точке. Погрешность измерений локальных скоростей потока не превышает 5 %. Сбор и обработка информации осуществляется микроЭВМ.

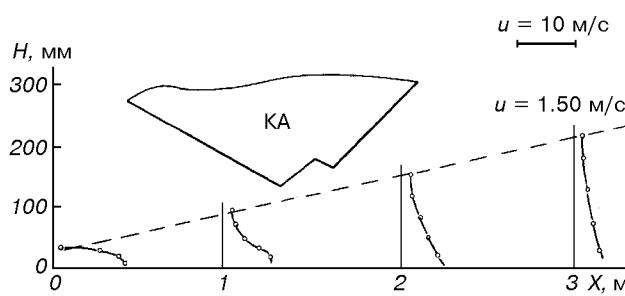


Рис. 2. Профили скоростей в пристенной струе на выходе из щелевого коллектора вдоль внутренней поверхности головного обтекателя

На рис. 2 представлены экспериментально определенные профили скоростей в пристенной струе на выходе из щелевого коллектора в области минимального зазора между КА и внутренней обшивкой обтекателя. Данные результаты получены на полномасштабном макете обтекателя КА РН «Зенит» после доработки щелевого коллектора с целью снижения начальных скоростей пристенных струй и обеспечения за счет этого допустимых скоростей вблизи поверхностей КА.

Наряду с отработкой общей системы термостатирования отсеков РН на данном стенде могут проводиться исследования газодинамических параметров и тепловых режимов при локальном обдуве командных приборов и ответственных узлов РН и КА (гироскопов, бортовых источников питания, пан-

лей солнечных батарей и др.). Стенд позволяет проводить исследования параметров локального обдува от индивидуальных источников воздухоснабжения (например, вентиляторов с сопловыми блоками, имеющими встроенные электронагреватели), которые в предстартовых условиях обеспечивают особо точное, с минимальным разбросом поддержание температурного режима отдельных элементов КА.

На рис. 3 показан фрагмент стенда с натурной системой локального обдува для исследования газодинамических параметров и тепловых режимов одной из панелей радиатора бортовой батареи КА. Для обдува панели используется вентилятор с сопловым блоком, конструкция которого в результате экспериментов выбрана таким образом, что обеспечивается близкое к равномерному распределение скоростей воздуха по поверхности исследуемой панели. Тепловыделения панели моделируются с помощью металлической пластины, имеющей тепловую связь с заполненной водой электронагреваемой ванной, тепловая мощность которой соответствует натурным условиям. Температурное поле на панели фиксируется хромель-копелевыми термопарами.

На рис. 4 показаны распределения скоростей и температур по оси симметрии панели радиатора бортовой батареи КА при локальном обдуве в предстартовый период, полученные при отработке устройства локального обдува на описанном выше стенде. Скорости обдува измерены термоанемометром на расстоянии 20 мм от поверхности панели, локальные температуры панели определялись тер-

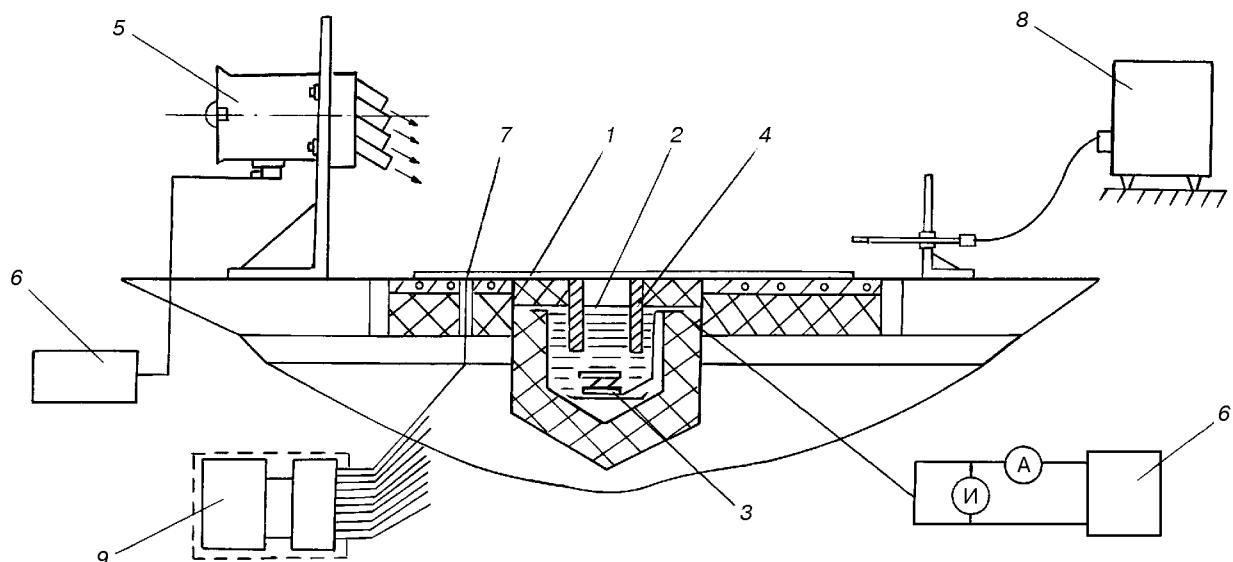


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования тепловых режимов радиатора бортовых батареи КА: 1 — макет радиатора, 2 — ванна, 3 — электронагреватель, 4 — пластины тепловой связи, 5 — устройство обдува, 6 — источник питания, 7 — термопара, 8 — термоанемометр, 9 — измерительная система

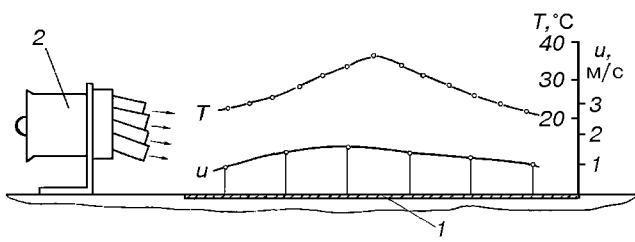


Рис. 4. Распределение скоростей воздуха вблизи панели и температуры панели по оси симметрии макета радиатора (номинальный режим обдува панели): 1 — макет радиатора, 2 — устройство обдува

мопарами. При ограничении скорости обдува ( $V \leq 1.5$  м/с) достигался заданный уровень значений средних коэффициентов конвективного теплоотвода с поверхности панелей ( $10—15$  Вт· $\text{м}^{-2}\text{K}^{-1}$ ).

#### РАСЧЕТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТНЫХ РАЗРАБОТОК СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Разработка расчетных методов СТС проводится в двух направлениях. Одно из них связано с расчетными оценками рабочих режимов СТС в наземных условиях, которые характеризуются принудительной подачей воздуха в терmostатируемые отсеки. Второе — с расчетным определением параметров воздуха в отсеках при полете РН на АУТ.

В условиях наземного терmostатирования общий подход к выбору параметров СТС состоит в определении расхода, температуры и давления, подаваемого в отсек воздуха, которые обеспечивают теплоотвод или подогрев приборов КА в зависимости от направления теплообмена между стенкой отсека и внешней атмосферой.

Для уменьшения влияния условий окружающей среды на температурный режим внутри терmostатируемого отсека стенки его выполняются с использованием материалов, обеспечивающих большое тепловое сопротивление. Так, например, конструкция оболочки отсека КА РН «Зенит» конструктивно выполнена из двух слоев с воздушной прослойкой между ними: наружного (несущего) — из сплава АМГ-6 и внутреннего — из стеклопластика. Поверхность слоя из стеклопластика, обращенная к наружной стенке, покрыта алюминиевой фольгой, обеспечивающей отражение лучистой тепловой энергии от внешней стенки.

Для расчета параметров воздуха, прокачиваемого через терmostатируемый отсек КА, используются уравнения изменения массы и энергии в замкнутом

объеме, ограниченном внутренней поверхностью стенки отсека и внешней поверхностью приборов. При записи уравнений полагается, что плотность, давление, температура воздуха в нем равны своим среднеобъемным значениям, и в общем случае зависят от времени. Полученная система уравнений замыкается уравнением состояния [5, 8].

Конкретный вид зависимостей, характеризующих подводимую (отводимую) тепловую мощность через стенки отсека учитывает следующие основные факторы:

- конвективный теплоподвод (отвод) к внешней стенке отсека в условиях свободной конвекции (в безветренную погоду) или в условиях вынужденной конвекции (при наличии ветра);
- конвективный теплоотвод (подвод) от внутренней стенки в условиях вынужденной конвекции (за счет прокачки терmostатирующего воздуха через отсек);
- теплоподвод в отсек за счет солнечной радиации;
- тепловыделения внутри отсека от работы приборов и аппаратов.

На этапе расчетных оценок гидравлических параметров СТС в наземных условиях функционирования составляется расчетная схема в виде набора простых гидравлических элементов с известными характеристиками, разрабатывается математическая модель течения потоков воздуха по каналам системы СТС внутри исследуемых отсеков и в выходных устройствах. Аналогичный подход применяется при определении распределения расходов терmostатирующего воздуха внутри различных отсеков по устройствам локальной вентиляции, средних и местных скоростей вблизи обдуваемых приборов и агрегатов.

Вторым направлением расчетных оценок СТС является исследование параметров воздушной среды (давления, температуры) в терmostатируемых отсеках в полетных условиях на активном участке траектории (дренирование), начиная с момента отсоединения СТС от наземных источников. Для этого необходима формулировка математических моделей перечисленных выше задач: определение внешних траекторных параметров на АУТ в целях определения газодинамических параметров на поверхности РН в окрестности выходных отверстий СТС; исследование поведения проточных трактов СТС; совместное решение задач внутренних течений в проточных трактах СТС и внешнего обтекания РН. При этом должны быть использованы результаты экспериментального определения гидравлических характеристик входных и выходных устройств СТС.

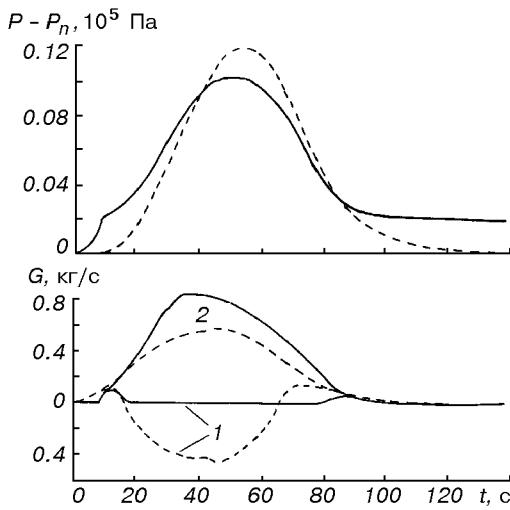


Рис. 5. Изменение параметров воздуха в отсеке КА при полете РН на АУТ: 1 — расход воздуха из выходного устройства на наветренной стороне, 2 — на подветренной стороне. Сплошные кривые — выходные отверстия с обратными клапанами, штриховые — без клапанов

Изменение внешнего давления на выходных устройствах СТС может быть определено различными методами: расчетным путем, по результатам модельных продувок ГО с выходными устройствами в аэродинамических трубах или с использованием летных данных. Однако расчетно-теоретические методы дают возможность получить более полную информацию при меньших временных и материальных затратах, поскольку возможности экспериментальной базы ограничены сложностью моделирования изменения таких определяющих параметров, как скорость движения, высота, состав газовой среды. Общая характеристика проблемы расчетного определения газодинамических параметров на поверхности РН и описание созданного в ИТМ НАНУ и НКАУ программно-методического обеспечения расчета аэрогазодинамических параметров РН при сверхзвуковом полете даны в работах [1, 6, 7, 9]. В частности, достаточно эвидентна методика оперативного расчета [6]. Для определения параметров обтекания ГО на дозвуковом участке полета могут быть использованы имеющиеся в ГКБ «Южное» методики.

Определение изменения параметров воздуха в отсеке КА при полете РН на АУТ может быть проведено по методике, представленной в [3]. В качестве примера использования этой методики на рис. 5 приведены расчетные данные по изменению давления в отсеке КА и расхода воздуха из отсека

при полете РН на АУТ для случая неравномерного распределения внешнего давления по поверхности обтекателя. Сплошные кривые соответствуют варианту с установкой обратных клапанов в выходных устройствах, штриховые — при отсутствии обратных клапанов. Кривые 1 отвечают расходу воздуха из выходного устройства, расположенного на наветренной стороне РН, кривые 2 — на подветренной стороне (общее количество внешних выходных устройств принято равным шести). Положительные значения расхода воздуха соответствуют истечению воздуха из отсека, отрицательные — втеканию воздуха в отсек. Из приведенных графиков видно, что отсутствие обратных клапанов в выходных устройствах при неравномерном распределении внешнего давления может приводить к втеканию наружного воздуха в отсек КА через выходные устройства, находящиеся в зонах максимального внешнего давления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ конструктивных и функциональных характеристик существующих систем термостатирования и дренирования РН показывает, что данные системы не в полной мере гарантируют обеспечение сохранности и работоспособности современных космических аппаратов, требующих повышенной частоты пространства отсека, более низкого уровня тепловых и аэродинамических нагрузок на КА. Поэтому разработку новых СТС и модернизацию существующих необходимо выполнять на качественно новом техническом уровне с использованием предлагаемых в данной статье универсальных модульных систем.

Модульный принцип конструирования СТС состоит в создании системы из отдельных модулей, каждый из которых представляет собой унифицированный взаимозаменяемый узел, выполняющий самостоятельную функцию при различных вариантах компоновки СТС. Это существенно упрощает общий монтаж вариантов системы и облегчает настройку и эксплуатацию отсека для различных типов современных КА.

Отработка модульных СТС ставит ряд проблемных вопросов, связанных с расчетно-экспериментальным определением термодинамических и гидравлических характеристик отдельных узлов и элементов, полей скоростей воздуха вблизи поверхности КА, осредненных коэффициентов конвективного теплообмена, характера изменения давления в отсеке КА при истечении воздуха из отсека во время полета РН на АУТ.

Для выполнение экспериментальных отработок модульных СТС и отдельных узлов в ИТМ НАНУ и НКАУ разработан и создан полномасштабный стенд для исследования характеристик систем терmostатирования. Стенд позволяет проводить отработку отдельных натурных элементов и узлов СТС для определения или подтверждения проектных параметров системы локального обдува отдельных элементов КА; определения тепловых режимов теплонапряженных элементов РН и КА; исследования гидравлических характеристик узлов и элементов системы терmostатирования отсеков РН. Методология экспериментальных исследований отработана при модернизации СТС РН «Зенит».

Существующее программно-методическое обеспечение позволяет проводить расчетные оценки термодинамических и гидравлических параметров модульных СТС для различных типов КА с учетом климатических и погодных условий на стартовой площадке, процессов дренажирования отсеков КА при полете на АУТ при дозвуковых и сверхзвуковых режимах обтекания.

Получаемые результаты дают возможность оценить степень конструктивного совершенства модульных СТС и дренажных устройств, обеспечивающих поддержание термодинамических характеристик в необходимых диапазонах.

Использование имеющегося научно-методического обеспечения при проектной проработке ряда СТС, разработанных в ГКБ «Южное», показало его достаточную эффективность.

1. Галинский В. П., Тимошенко В. И. Проблемы создания научно-методического обеспечения по аэrodинамике ракет-носителей // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 64—72.
2. Горбулин В. П., Завалишин А. П., Негода А. А., Яцків Я. С. О космической программе Украины // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 7—12.
3. Дегтяренко В. И. Определение параметров воздуха в отсеке ракеты на активном участке полета // Техническая механика.—1999.—№ 1.—С. 17—22.

4. Логачев П. П., Ляшенко Ю. Г., Осадчий А. В. Экспериментальный метод определения поля скоростей и степени турбулентности газового потока с автоматизированным съемом информации // Механика жидкости и газа: Тез. доклада ежегодной научной школы-семинара ЦАГИ. — ЦАГИ, 1992.—С. 118—119.
5. Тимошенко В. И., Белоцерковец И. С. Расчет среднеобъемных параметров в емкости с учетом массо- и энергоподвода, химических и фазовых превращений во времени // Техническая механика.—1994.—№ 3.—С. 25—29.
6. Тимошенко В. И., Галинский В. П. Оперативный расчет пространственного сверхзвукового обтекания тел, близких к осесимметричным // Изв. Вузов. Авиационная техника.—1991.—№ 4.—С. 22—26.
7. Тимошенко В. И., Галинский В. П., Белоцерковец И. С. Проблемы математического моделирования процессов аэро-газодинамики ракет-носителей // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка.—1998.—1, вип. 1.—С. 37—52.
8. Тимошенко В. И., Кнышленко Ю. В., Дегтяренко В. И. Математическая модель газодинамических процессов в системе гидравлически связанных емкостей // Техническая механика.—1993.—№ 5.—С. 3—9.
9. Timoshenko V. I., Galinsky V. P., Belotserkovets I. S. Problems scientific-methodical aerodynamicalof support of development of boost vehicles // Proc. of the 2nd Ankara Intern. Aerospesce Conf., Ankara, Turkey, 9-11 Sept., 1998.—P. 445—452.

#### PROBLEMS OF THERMOSTATIC CONTROL AND SPACECRAFT SAFETY AT THE PRE-LAUNCH PERIOD AND DURING ORBITAL INJECTION

V. I. Timoshenko, A. V. Agarkov, Yu. I. Moshnenko,  
V. N. Sirenko, Yu. V. Knyshlenko, and Yu. G. Lyashenko

We consider the problems of thermostatic control and spacecraft safety at the pre-launch period and during the powered flight of the launch vehicle. The present-day state and thermostatic control systems (TCS) development is conducted for spacecraft sections are analyzed. A module principle of TCS construction is proposed. Characteristics of experimental and software support of the modern TCS design, creation and development work are presented.

УДК 629.78:04(075.8)

# К вопросу построения и решения уравнений колебаний криволинейных стержневых пространственных конструкций применение космического

**С. В. Хорошилов, В. В. Шаповаленко**

Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ, Дніпропетровськ

*Надійшла до редакції 01.02.99*

Викладаються питання побудови рівнянь коливань криволінійних стержневих конструкцій космічного застосування. Розглядається метод розв'язання частотних рівнянь, який використовує властивості глобальної матриці жорсткості і мас конструкції. Ефективність цього методу підтверджується розрахунком динамічних характеристик для конкретної параболічної антени.

Многие из современных космических аппаратов (КА) имеют большие линейные размеры, причем аппараты, как правило, состоят из основного тела (корпуса) и присоединенных к нему элементов, таких как стержни (штанги) различного назначения, панели солнечных батарей, параболические антенны и др.

Полнота учета динамической взаимосвязи таких аппаратов как объектов управления и систем управления их ориентацией во многом определяет устойчивость и качество управления КА. Недооценка этого фактора неоднократно приводила к отрицательным последствиям. На современном этапе развития космической техники учет влияния упругости элементов конструкции стал необходимым.

Вращательное движение КА, представляющего собой твердый абсолютно жесткий корпус с присоединенными к нему нежесткими элементами, описывается известными динамическими уравнениями Эйлера и уравнениями, характеризующими движение присоединенных элементов. Для определения коэффициентов этих уравнений необходимо знание динамических характеристик (частот и форм собст-

венных колебаний) присоединенных элементов.

Методы расчета частот и форм колебаний стержней и панелей солнечных батарей разработаны достаточно хорошо. Однако для упругих криволинейных пространственных конструкций типа параболической антены они практически неизвестны. Настоящая статья посвящена вопросам определения частот и форм собственных колебаний таких конструкций.

Для расчета собственных динамических характеристик больших нежестких трансформируемых конструкций используем метод конечных элементов [2]. Реальную конструкцию будем представлять моделью, состоящей из стержней, шарниров и точечных масс с соответствующими геометрическими, массовыми и диссипативными характеристиками.

Для описания деформаций узловых точек конструкции введем связанные с  $i$ -ми стержнями локальные системы координат  $O_i X_i Y_i Z_i$  с началами  $O_i$  в точках соединения стержней. Зададим для каждого узла соединений обобщенные координаты, характеризующие деформации конструкции:  $\tilde{v}_{xi}$ ,  $\tilde{v}_{yi}$ ,  $\tilde{v}_{zi}$  — перемещения узла конструкции в направлении

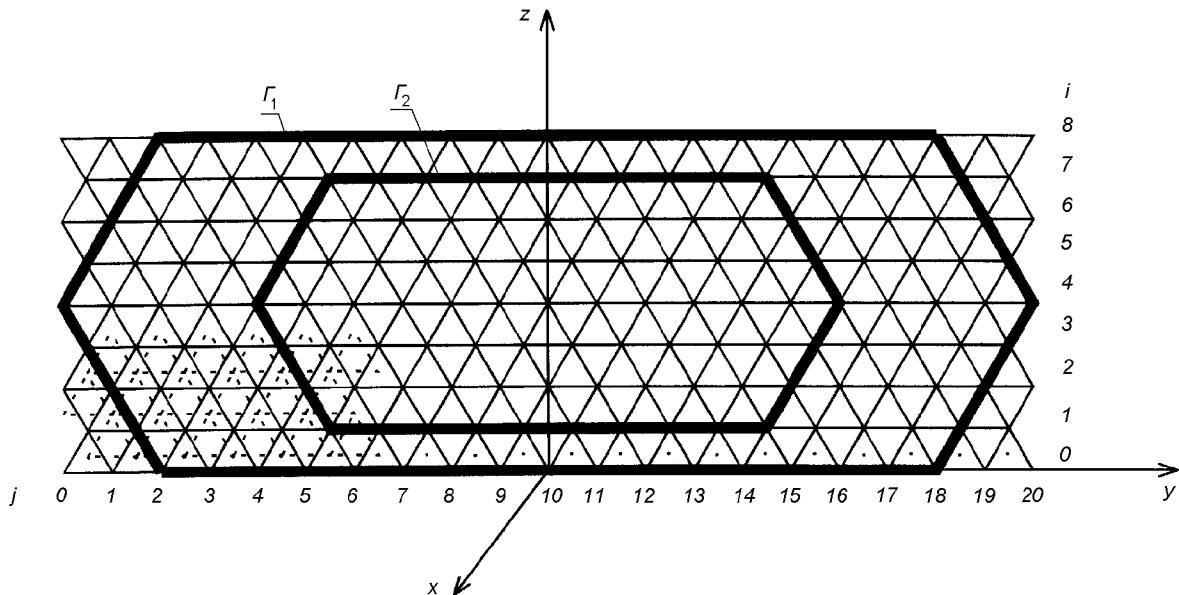


Рис. 1. Расчетная схема параболической антенны

осей  $O_iX_i$ ,  $O_iY_i$ ,  $O_iZ_i$ ;  $\tilde{p}_{xi}$ ,  $\tilde{p}_{yi}$ ,  $\tilde{p}_{zi}$  — повороты элементарного участка конструкции относительно соответственных осей.

Определим потенциальную энергию конструкции через обобщенные координаты перемещений в узлах конструкции.

Потенциальную энергию стержня можно представить в виде

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \int_0^l \left[ EJ_y \left( \frac{d^2 \tilde{v}_z(x)}{dx^2} \right)^2 + EJ_z \left( \frac{d^2 \tilde{v}_y(x)}{dx^2} \right)^2 + ES \left( \frac{d^2 \tilde{p}_x(x)}{dx^2} \right)^2 + GJ_p \left( \frac{d^2 \tilde{p}_y(x)}{dx^2} \right)^2 \right] dx, \quad (1)$$

где  $l$  — длина стержня,  $E$  — модуль Юнга материала стержня,  $G$  — модуль сдвига,  $S$  — площадь поперечного сечения материала стержня,  $J_y$ ,  $J_z$  — моменты инерции сечения стержня относительно осей локальной системы координат,  $J_p$  — полярный момент инерции.

Выражение (1) можно переписать в виде

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{X}}_1^T \tilde{\mathbf{A}}_c \tilde{\mathbf{X}}_1, \quad (2)$$

где  $\tilde{\mathbf{X}}_1^T = (\tilde{v}_{xi}, \tilde{v}_{yi}, \tilde{v}_{zi}, \tilde{p}_{xi}, \tilde{p}_{yi}, \tilde{p}_{zi}, \tilde{v}_{xj}, \tilde{v}_{yj}, \tilde{v}_{zj}, \tilde{p}_{xj}, \tilde{p}_{yj}, \tilde{p}_{zj})$  — вектор обобщенных координат в локальной системе координат ( $i$  соответствует началу, а  $j$  — концу стержня);  $\tilde{\mathbf{A}}_c$  — симметричная и положительно определенная матрица, ненулевые элементы которой определяются формулами

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \alpha_4 l^2, & a_{1,7} &= -\alpha_4 l^2, & a_{2,2} &= 12\alpha_2, \\ a_{2,6} &= 72\alpha_2 l, & a_{2,8} &= -12\alpha_2, & a_{2,12} &= 6\alpha_2 l, \\ a_{3,3} &= 12\alpha_1, & a_{3,5} &= -6\alpha_1 l, & a_{3,9} &= -12\alpha_1, \\ a_{3,11} &= -6\alpha_1 l, & a_{4,4} &= \alpha_3 l^2, & a_{4,10} &= -\alpha_3 l^2, \\ a_{5,6} &= 4\alpha_1 l^2, & a_{5,9} &= 6\alpha_1 l, & a_{5,11} &= 2\alpha_1 l^2, \\ a_{6,6} &= 6\alpha_2 l, & a_{6,8} &= -6\alpha_2 l, & a_{6,12} &= 2\alpha_2 l^2, \\ a_{7,7} &= \alpha_4 l^2, & a_{8,8} &= 12\alpha_2, & a_{8,12} &= -6\alpha_2 l, \\ a_{9,9} &= 12\alpha_1, & a_{9,11} &= 6\alpha_1 l, & a_{10,10} &= \alpha_3 l^2, \\ a_{11,11} &= 4\alpha_1 l^2, & a_{12,12} &= 4\alpha_2 l^2, \end{aligned}$$

где

$$\alpha_1 = \frac{EJ_y}{l^3}, \quad \alpha_2 = \frac{EJ_z}{l^3}, \quad \alpha_3 = \frac{ES}{l^3}, \quad \alpha_4 = \frac{ES}{l^3}.$$

Вектору  $\tilde{\mathbf{X}}_1$  соответствует аналогичный вектор в глобальной системе координат  $oxuz$  (см. рис. 1)

$$\mathbf{X}_1^T = (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}, p_{xi}, p_{yi}, p_{zi}, v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}, p_{xj}, p_{yj}, p_{zj}).$$

Между вектором  $\tilde{\mathbf{X}}_1$  и  $\mathbf{X}_1$  существует связь

$$\tilde{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{H} \mathbf{X}_1, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}$  — матрица перехода из локальной в глобальную систему координат.

С учетом соотношений (2) и (3) получаем выражение для потенциальной энергии стержня в обобщенных глобальных координатах:

$$\Pi_c = \frac{1}{2} \mathbf{X}_1^T \tilde{\mathbf{A}}_c \mathbf{X}_1,$$

где  $\tilde{\mathbf{A}}_c = \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{A}}_c \mathbf{H}$  — глобальная матрица жесткости

стержня в терминах локальных обобщенных координат.

Потенциальную энергию шарнира можно записать в терминах глобальных обобщенных координат таким образом:

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} [Q_x(p_{xi} - p_{xj})^2 + Q_y(p_{yi} - p_{yj})^2 + Q_z(p_{zi} - p_{zj})^2] = \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{A}_w \mathbf{X}_2, \end{aligned}$$

$$\mathbf{X}_2^T = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi}, p_{xj}, p_{yj}, p_{zj}),$$

где  $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$  — упругие восстанавливающие моменты шарнира.

Полная потенциальная энергия конструкции равна сумме потенциальных энергий всех стержней и шарниров и может быть представлена в форме

$$P = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{A} \mathbf{X}.$$

Матрица жесткости  $\mathbf{A}$  всей конструкции находится суммированием соответствующих матриц жесткости отдельных частей конструкции.

Определим кинетическую энергию конструкции через обобщенные скорости в узлах конструкции.

Кинетическую энергию стержня представим так:

$$K_c = \frac{1}{2} \int_0^l \rho [\dot{\vec{v}}_x^2(x) + \dot{\vec{v}}_y^2(x) + \dot{\vec{v}}_z^2(x)] dx, \quad (4)$$

где  $\rho$  — линейная плотность стержня.

Выражение (4) можно переписать в виде

$$K_c = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{X}}}^T \tilde{\mathbf{B}}_c \dot{\tilde{\mathbf{X}}}.$$

Матрица  $\tilde{\mathbf{B}}_c$  симметричная и положительно определенная, ее ненулевые элементы вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} b_{1,1} &= \frac{1}{3} \rho l, & b_{1,7} &= \frac{1}{6} \rho l, & b_{2,2} &= \frac{13}{35} \rho l, \\ b_{2,5} &= \frac{11}{210} \rho l^2, & b_{2,8} &= \frac{9}{70} \rho l, & b_{2,12} &= -\frac{13}{420} \rho l^2, \\ b_{3,3} &= \frac{13}{35} \rho l, & b_{3,5} &= -\frac{11}{210} \rho l^2, & b_{3,9} &= \frac{9}{70} \rho l, \\ b_{3,11} &= \frac{13}{420} \rho l^2, & b_{5,5} &= \frac{1}{105} \rho l^3, & b_{2,9} &= -\frac{13}{420} \rho l^2, \\ b_{5,11} &= \frac{1}{140} \rho l^3, & b_{6,6} &= \frac{1}{105} \rho l^3, & b_{6,8} &= \frac{13}{420} \rho l^3, \\ b_{5,12} &= -\frac{1}{140} \rho l^3, & b_{7,7} &= \frac{1}{3} \rho l, & b_{8,8} &= \frac{13}{35} \rho l, \end{aligned}$$

$$b_{8,12} = -\frac{11}{210} \rho l^2, \quad b_{9,9} = \frac{13}{35} \rho l, \quad b_{9,11} = \frac{11}{210} \rho l^2,$$

$$b_{11,11} = \frac{1}{105} \rho l^3, \quad b_{12,12} = \frac{1}{105} \rho l^3.$$

Запишем выражение для кинетической энергии в терминах глобальной системы координат в форме

$$K_c = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_1^T \mathbf{B}_c \dot{\mathbf{X}}_1,$$

где  $\mathbf{B}_c = \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{B}}_c \mathbf{H}$  — глобальная матрица масс, выраженная в терминах локальной системы координат.

Кинетическую энергию точечной массы  $m_i$  сразу запишем в терминах глобальной системы координат

$$K_M = \frac{1}{2} m_i [\dot{v}_{xi}^2 + \dot{v}_{yi}^2 + \dot{v}_{zi}^2] = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_2^T \mathbf{B}_M \dot{\mathbf{X}}_2,$$

$$\text{где } \dot{\mathbf{X}}_2^T = (\dot{v}_{xi}, \dot{v}_{yi}, \dot{v}_{zi}).$$

Полная кинетическая энергия конструкции равна сумме кинетических энергий всех стержней и соединительных масс. Матрица масс всей конструкции  $\mathbf{B}$  получается суммированием соответствующих элементов матриц масс отдельных частей конструкции. В матричной форме кинетическая энергия всей конструкции имеет вид

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{B} \dot{\mathbf{X}}.$$

Для учета рассеивания энергии в стержнях и шарнирах по аналогии с матрицами жесткости  $\mathbf{A}_c$  и  $\mathbf{A}_w$  введем матрицы диссипации  $\mathbf{F}_c$  и  $\mathbf{F}_w$ .

Матрица диссипации для стержня пропорциональна матрице жесткости:

$$\mathbf{F}_c = \frac{\psi_c}{2\pi} \mathbf{A}_c,$$

где  $\psi_c$  — коэффициент поглощения энергии материалом стержня; матрица диссипации для шарнира имеет вид

$$\mathbf{F}_w = \frac{\psi_w}{2\pi} \mathbf{A}_w,$$

где  $\psi_w$  — коэффициент поглощения энергии шарниром.

Для определения собственных динамических характеристик криволинейных стержневых конструкций необходимо решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\mathbf{B} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{A} \mathbf{X} + \frac{1}{\omega} \mathbf{F} \dot{\mathbf{X}} = 0, \quad (5)$$

где  $\omega$  — частота собственных колебаний конструкции.

Будем искать решение уравнения (5) в виде

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Z} \exp(i\omega t). \quad (6)$$

Подставив решение (6) в уравнение (5), получим задачу на собственные значения и собственные векторы

$$(A + iF)Z = \omega^2 BZ. \quad (7)$$

Задача (7) отличается от классических задач линейной алгебры на собственные значения и векторы, и ее решение в общем случае затруднительно. Кроме того, размерности матриц  $A$  и  $B$  могут иметь высокий порядок.

Важнейшие из специальных свойств матриц  $A$  и  $B$  — симметрия относительно главной диагонали, положительная определенность и высокая степень разреженности. Последнее означает, что лишь незначительная часть элементов матриц отлична от нуля. Указанные особенности позволяют эффективно использовать специальное программное обеспечение, ориентированное на работу с такими матрицами.

Воспользуемся тем фактом, что элементы матрицы  $F$  на два-три порядка меньше элементов матрицы  $A$ . Тогда вместо задачи (7) имеем

$$(A - \omega^2 B)Z = 0. \quad (8)$$

После нахождения собственных значений и векторов задачи (8) методом малого параметра определим собственные значения задачи (7).

Представляется эффективным применение для этой цели градиентного алгоритма, использующего экстремальные свойства отношения Релея

$$\mu(Z) = \frac{(AZ, Z)}{(BZ, Z)}.$$

Этим методом довольно точно определяется собственное число, но с меньшей точностью вычисляется собственный вектор. А так как последующий собственный вектор ищется в подпространстве, ортогональном всем предыдущим собственным векторам, то накапливается погрешность задания ортогонального подпространства.

После вычисления собственного вектора градиентным методом его необходимо уточнить. Применим для этой цели метод обратной итерации со сдвигом. Пусть  $\mu_0$  и  $Z_0$  — собственное число и собственный вектор, полученные градиентным способом. Уточненный собственный вектор  $Z_1$  определяется из системы

$$KZ_1 = BZ_0, \quad (9)$$

где  $K = A - \mu_0 B$ . Так как обращать матрицу  $K$  очень сложно ввиду ее большой размерности, то целесообразно представить ее в виде [1]

$$K = LDL^T, \quad (10)$$

где  $L$  — нижняя (левая) треугольная матрица с единичной диагональю,  $D$  — диагональная матрица.

На основании разложения (10) система уравнений (9) запишется так:

$$LDL^T Z_1 = BZ_0.$$

Введем вспомогательный вектор  $Y$

$$Y = DL^T Z_1.$$

Тогда система (9) распадается на две системы уравнений:

$$LY = BX_0,$$

$$L^T Z_1 = D^{-1} Y,$$

последовательно решая которые определяем  $Z_1$ .

При разложении матрицы  $K$  целесообразно использовать алгоритм внешних произведений. Основная арифметическая операция алгоритма внешних произведений — вычисление произведения двух элементов одного столбца с последующим вычитанием из соответствующего элемента другого столбца. Таким образом, происходит заполнение матрицы ненулевыми элементами, в результате чего увеличиваются затраты памяти ЭВМ. Если, например, матрица  $K$  имеет отличные от нуля лишь первые столбец, строку и главную диагональ, соответствующий треугольный множитель  $L$  целиком заполняется новыми ненулевыми элементами под главной диагональю.

Если в рассмотренной матрице  $K$  выполнить симметричную перестановку, сделав первые строку и столбец последними, заполнения матрицы  $L$  не произойдет.

Таким образом, рациональная симметричная перестановка строк и столбцов исходной симметричной матрицы  $K$  может привести к уменьшению числа новых ненулевых элементов, возникающих в матрице  $L$  в процессе разложения. Таких перестановок, очевидно, существует  $N!$  ( $N$  — порядок матрицы  $K$ ), поэтому нельзя найти оптимальный вариант путем перебора (дающий минимальное число ненулевых элементов). На практике используют какой-либо эвристический алгоритм поиска перестановки, близкой к оптимальной.

Задача нахождения рациональной симметричной перестановки строк и столбцов (задача упорядочения матрицы) наиболее наглядно формулируется и решается в терминах теории графов.

Пусть дана некоторая симметричная матрица  $K$ . Поставим ей в соответствие ненаправленный граф  $G$  согласно следующим правилам: 1) каждой строке (столбцу) соответствует одна вершина; 2) если некоторый внедиагональный элемент  $k_{ij}$  матрицы

отличен от нуля, вершины  $i$  и  $j$  соединены ветвью; в противном случае ветвь отсутствует. Тогда заполнение матрицы можно «промоделировать», рассматривая только граф. Действительно, появление новых ненулевых элементов в ячейке  $k_{lm}$  адекватно появлению в графе еще одной ветви, соответствующей вершинам  $l$  и  $m$ .

Симметричная перестановка строк и столбцов эквивалентна изменению порядка выбора (исключения) вершин графа в процессе моделирования разложения.

Существует несколько весьма удачных алгоритмов квазиоптимальной перенумерации вершин графа. Так, в данном случае целесообразно использовать алгоритм минимальной степени; на очередном шаге перенумерации из всех вершин выбирается та, которая в данный момент имеет наименьшую степень.

Пусть вычислены и уточнены  $n$  первых значений и векторов задачи (8):

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n,$$

$$\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n.$$

Рассмотрим задачу на собственные значения

$$(\mathbf{A} + \mu i\mathbf{F})\mathbf{Z} = \omega^2 \mathbf{B}\mathbf{Z}, \quad (11)$$

где  $\mu$  — малый параметр. Решение этой задачи запишем в виде разложения в ряд по малому параметру

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_j &= \mathbf{Z}_{0j} + \mu \mathbf{Z}_{1j} + \mu^2 \mathbf{Z}_{2j} + \dots, \\ \omega_j^2 &= \omega_{0j}^2 + \mu \omega_{1j}^2 + \mu^2 \omega_{2j}^2 + \dots. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя представление (12) в уравнение (11) и приравнивая члены при одинаковых степенях  $\mu$ , получим последовательность уравнений

$$\mathbf{A}\mathbf{Z}_{0j} - \omega_{0j}^2 \mathbf{B}\mathbf{Z}_{0j} = 0, \quad (13)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{Z}_{1j} - \omega_{0j}^2 \mathbf{B}\mathbf{Z}_{1j} = (\omega_{1j}^2 \mathbf{B} - i\mathbf{F})\mathbf{Z}_{0j}. \quad (14)$$

Решение задачи (13) уже получено:

$$\omega_{0j}^2 = \lambda_j,$$

$$\mathbf{Z}_{0j} = \mathbf{y}_j.$$

Определитель системы (14) будет равен нулю. Поэтому, чтобы система (14) была разрешима, необходимо, чтобы ее правые части были ортогональными  $\mathbf{Z}_{0j}$ :

$$((\omega_{1j}^2 \mathbf{B} - i\mathbf{F})\mathbf{Z}_{0j}, \mathbf{Z}_{0j}) = 0.$$

Отсюда находим

$$\omega_{1j}^2 = i(\mathbf{F}\mathbf{Z}_{0j}, \mathbf{Z}_{0j})$$

при условии, что  $(\mathbf{B}\mathbf{Z}_{0j}, \mathbf{Z}_{0j}) = 1$ , после чего определяем  $\mathbf{Z}_{1j}$ . В результате получаем собственные значения и векторы задачи (7)

$$\omega_j^2 = \omega_{0j}^2 + \omega_{1j}^2 = i(\mathbf{F}\mathbf{y}_j, \mathbf{y}_j),$$

$$\mathbf{Z}_j = \mathbf{Z}_{0j} + \mathbf{Z}_{1j} = \mathbf{y}_j + \mathbf{Z}_{1j}.$$

Для иллюстрации изложенного метода расчета частот собственных колебаний сложных пространственных стержневых конструкций выбрана параболическая антенна космического применения типа КРТ-10.

Эта антенна имеет следующие характеристики:

габаритные размеры фермы	$16 \times 5.6$ м
общее количество узловых соединений	302
общее количество складных стержней	840
количество складных стержней	456
на выпуклой поверхности	
количество складных стержней	384
на вогнутой поверхности	
общее количество диагональных стержней	432
общая длина труб	1000 м
длина складного стержня	0.8 м
на выпуклой поверхности	
длина складного стержня на вогнутой поверхности	0.757 м
длина диагонального стержня	0.8 м
толщина стенки стержня	$0.58 \cdot 10^{-3}$ м
жесткость стержня	$20.2 \text{ Нм}^2$
площадь поперечного сечения трубы	$0.16 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup>
момент инерции трубы	$0.11 \cdot 10^{-8}$ м <sup>4</sup>
фокальный параметр	7.75 м

Для этих расчетов определялись координаты всех узлов вогнутой и выпуклой поверхностей антенны, а также множества стержней антенны.

Большое количество узлов антенны требует большого объема памяти для хранения элементов матриц, а также значительных затрат машинного времени при нахождении собственных векторов и собственных чисел. Поэтому вычисления проводились поэтапно.

На первом этапе рассчитывались частоты усеченной конструкции антенны, обведенной на рис. 1 контуром  $\Gamma_2$ .

На втором этапе производился поиск эквивалентной по жесткости однослойной конструкции. Жесткость однослойной конструкции определялась из условия равенства первых частот собственных

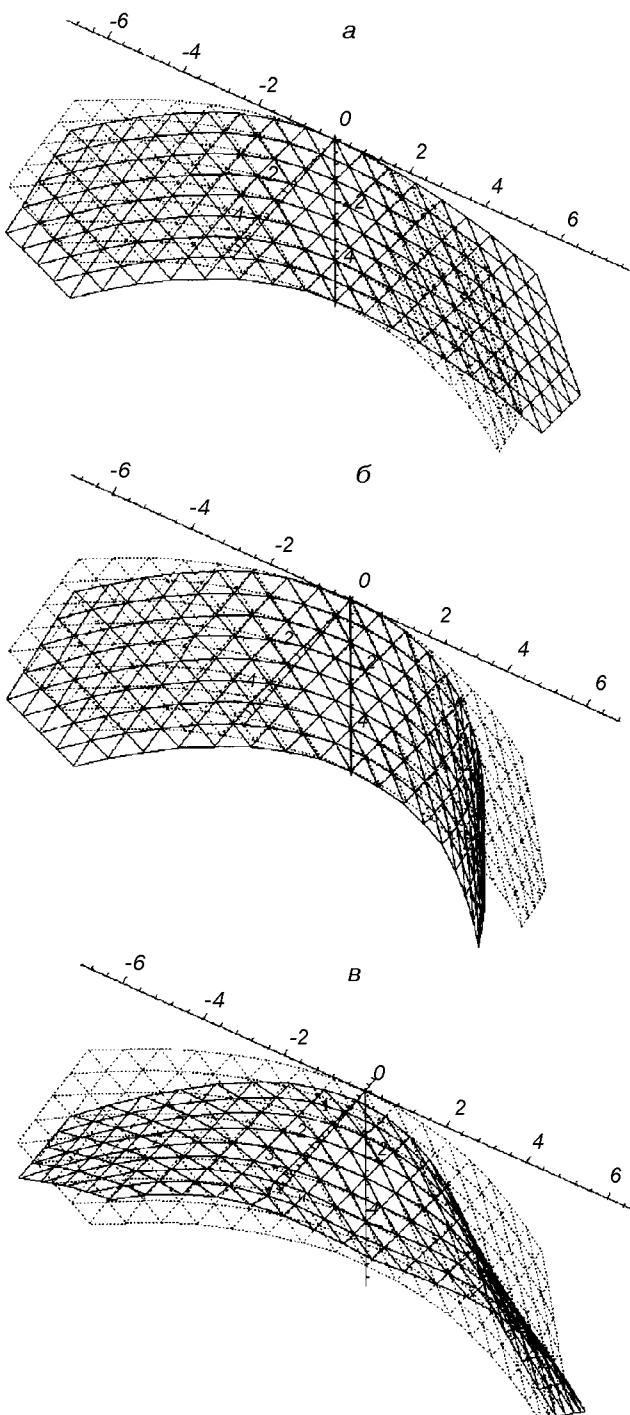


Рис. 2. Три формы собственных колебаний параболической антенны

**Частоты и декременты собственных колебаний параболической антенны**

	Первая форма собственных колебаний	Вторая форма собственных колебаний	Третья форма собственных колебаний
Частота, Гц	0.416265	0.418875	1.06289
Частота (-), Гц	0.416307	0.418917	1.063
Декремент	0.125445	0.125465	0.125639

колебаний пространственной и однослойной конструкций.

На третьем этапе частоты и формы собственных колебаний антенны рассчитывались по эквивалентной однослойной модели.

На рис. 2 приведены три формы собственных колебаний антенны, соответствующие первым трем частотам.

В таблице представлены результаты расчетов частот и декрементов собственных колебаний антенны. Величина «частота (-)» соответствует частоте колебаний без учета диссипации энергии.

1. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений. — М.: Мир, 1984.—333 с.
2. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. — М.: Мир, 1988.—428 с.

**ON SETTING UP AND SOLVING THE EQUATIONS OF OSCILLATIONS IN CURVILINEAR THREE-DIMENSIONAL ROD CONSTRUCTIONS DESTINED FOR SPACE APPLICATION**

S. V. Khoroshilov, V. V. Shapovalenko

We consider the problem of setting up the equations of oscillations in curvilinear rod constructions destined for space application. The method of solving the frequency equations using the properties of the global stiffness and mass matrices of the construction is described. The efficiency of this method is confirmed by calculations of the dynamic characteristics for a specific parabolic antenna.

УДК 621.39

# Прием фазоманипулированных сигналов оптического диапазона квантовым счетчиком

А. С. Мазманишвили

Харківський державний політехнічний університет

Надійшла до редакції 30.08.99

Вивчена статистика фотовідрахунків фазоманіпульованого оптичного сигналу на фоні нормального марковського шуму. Знайдена твірна функція фотовідрахунків адитивного поля випромінювання. Приведено чисельні характеристики розподілу відрахунків та ймовірність прийняття помилкового висновку при реєстрації. Показано, що зі зменшенням ширини спектрального контура лінії шумового випромінювання ймовірність помилки збільшується.

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерные информационные системы объединяют широкий класс оптических систем, в которых излучение оптических квантовых генераторов (ОКГ) является носителем информации. Применение ОКГ в информационных системах оптической связи, локации и измерения (лидари, дальномеры, спектрометры) обеспечивает высокие потенциальные возможности таких систем, пределы которых ограничиваются физическими законами. Существенные ограничения накладываются шумами как в самих ОКГ, так и в других элементах систем. Поэтому анализ, методы учета и расчета шумов, возникающих в ОКГ и в других элементах на участках тракта систем, требуют внимания и корректного учета. Используя ОКГ, можно обеспечить достаточно высокую направленность пучков светового излучения, большую мощность в импульсном режиме. Современное развитие квантовой радиоэлектроники позволяет надеяться на успешное решение проблемы нацеливания узких лучей ОКГ.

В настоящей работе будут рассмотрены предельные возможности лазерных систем связи, их помехоустойчивость при приеме фазоманипулированных сигналов квантовым счетчиком, регистрирующим когерентное излучение на фоне нормального

марковского шума. Анализ такой проблемы со статистических позиций связан с практической возможностью создания антенных устройств спутниковых приемопередатчиков и действием помех в каналах при больших дальностях.

Большие дальности космических трасс оптической связи, многоканальность систем, высокое быстродействие и, как следствие, малая длительность временного интервала, отводимого для анализа, невысокая мощность ОКГ в непрерывном режиме — все это обуславливает слабую интенсивность принимаемого сигнала (малое число отсчетов на выходе приемной системы).

При малом числе фотоотсчетов, регистрируемых квантовым счетчиком, основной характеристикой, описывающей результат детектирования, является распределение вероятностей  $P(m)$  появления фиксированного числа  $m$  отсчетов (фотоэлектронов) за интервал регистрации  $T$ . Согласно формуле Манделя [1] эта вероятность равна

$$P(m) = \left\langle \frac{1}{m!} \Omega^m \exp(-\Omega) \right\rangle, \quad (1)$$

$$\Omega = \int_0^T |\xi(t)|^2 dt. \quad (2)$$

Здесь  $\xi(t)$  — комплексная амплитуда поля излуче-

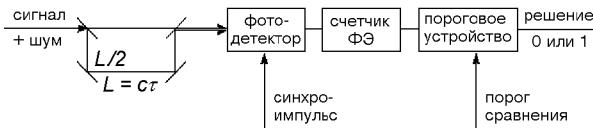


Рис. 1. Блок-схема приема сигналов с фазовой манипуляцией;  $\tau$  — время задержки

ния. Для приема двоичных фазоманипулированных сигналов на фоне шума с помощью двухлучевого интерферометра с временным сдвигом  $\tau$  в одном из плеч интерферометра длиной  $L$  имеем (рис. 1)

$$\xi(t) = \frac{1}{2} \{ \beta(t) + \alpha(t) + [\beta(t + \tau) + \alpha(t + \tau)] \exp(i\omega\tau) \}, \quad (3)$$

где  $\beta(t)$  и  $\alpha(t)$  — комплексные амплитуды когерентной и шумовой составляющих оптического излучения;  $\omega$  — несущая частота;  $\tau$  — длительность временной задержки в плече фазоманипулятора. При отсутствии помехи распределение (1) является пуассоновским. При наличии помехи распределение  $P(m)$  будет результатом статистического усреднения (обозначенного в (1) угловыми скобками) по реализациям в интервале длительностью  $T$  случайной функции — комплексной амплитуды  $\alpha(t)$ .

Исчерпывающей величиной, содержащей все характеристики распределения отсчетов, является производящая функция

$$Q_r(\lambda; \beta; \alpha) \equiv \langle \exp(-\lambda\Omega) \rangle = \int D^2\alpha(t) \exp\left(-\lambda \int_0^T |\xi(t)|^2 dt\right), \quad (4)$$

где символом  $D^2\alpha(t)$  обозначен «дифференциал» в пространстве функций  $\alpha(t)$  [4]. Согласно [1]

$$P(m) = \frac{(-1)^m}{m!} \frac{d^m}{d\lambda^m} Q_r(\lambda; \beta; \alpha) |_{\lambda=1}. \quad (5)$$

В настоящей работе будет принято, что шумовой компонент  $\alpha(t)$  поля излучения обладает свойствами комплекснозначного стационарного нормального марковского процесса [3, 5], характеризуемого следующей переходной плотностью распределения вероятностей:

$$w(\alpha, t; \alpha', t') = \frac{1}{\pi\sigma_\alpha(1 - |q|^2)} \exp\left(-\frac{|\alpha - q\alpha'|^2}{\sigma_\alpha(1 - |q|^2)}\right), \quad (6)$$

где

$$q = \exp[-(\nu - i\omega_\alpha) |t - t'|],$$

и равновесной плотностью распределения вероятностей

$$w(\alpha) = \frac{1}{\pi\sigma_\alpha} \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{\sigma_\alpha^2}\right), \quad (7)$$

где  $\sigma_\alpha = \langle |\alpha(t)|^2 \rangle$  — интенсивность шума,  $\omega_\alpha$  и  $\nu$  — несущая частота и ширина линии шумового излучения.

Для успешного синтеза оптимального приемника оптического диапазона необходимо полное статистическое описание (т. е. предъявление вероятностных характеристик) наблюдаемых величин типа (2). Перейдем к решению этой задачи.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТСЧЕТОВ

Производящая функция (4) и вероятность (5) являются математическими ожиданиями — функциональными интегралами в пространстве функций  $\alpha(t)$  [4]. Для их нахождения воспользуемся тождеством

$$\exp(-|\xi|^2) = \int \exp[-\pi|z|^2 + i\sqrt{\pi}(z\xi^* + z^*\xi)] d^2z, \quad (8)$$

с помощью которого перейдем в выражении (4) к функциональному фурье-интегралу

$$Q_r(\lambda; \beta; \alpha) = \int D^2\alpha(t) \int D^2z(t) \times \times \exp\left[-\pi \int_0^T |z(t)|^2 dt + i\sqrt{\pi\lambda/4} \int_0^T \text{Re}[z(t)\xi^*(t)] dt\right]. \quad (9)$$

Процесс  $\alpha(t)$  в силу (6), (7) является гауссовым, следовательно, интеграл

$$G = \sqrt{\pi\lambda/4} \int_0^T [z(t)\xi^*(t) + z(t)^*\xi(t)] dt \quad (10)$$

также является нормальной случайной величиной. Поэтому

$$\langle \exp(iG) \rangle = \exp\left(i\langle G \rangle - \frac{1}{2} [\langle |G|^2 \rangle - \langle G \rangle^2]\right). \quad (11)$$

Возникшие первый и второй моменты равны

$$\begin{aligned} \langle G \rangle &= \sqrt{\pi\lambda} \text{Re} \int_0^T z^*(t) [\beta(t) + \beta(t + \tau) \exp(i\omega\tau)] dt, \\ \langle |G|^2 \rangle &= \langle G \rangle^2 + 2\pi\lambda\sigma_\alpha(1 + \cos\omega\tau) \times \\ &\times \int_0^T \int_0^T z(t) z^*(t') \exp(-\nu|t - t'|) dt dt'. \end{aligned} \quad (12)$$

Введем обозначения:  $\varphi_\tau = \omega\tau$  — разность фаз в манипуляторе,  $\Phi_\tau = \exp(i\varphi_\tau)$ , а также

$$R_\tau = \frac{1}{2} [1 + \cos(\omega\tau)\exp(-\nu\tau)]. \quad (13)$$

В результате усреднения по множеству случайных функций  $\alpha(t)$  найдем

$$\begin{aligned} Q_\tau(\lambda; \beta; \alpha) = & \int D^2z(t)\exp\left[-\pi\int_0^T |z(t)|^2 dt + \right. \\ & + i\sqrt{\pi\lambda}\int_0^T \operatorname{Re}[z^*(t)[\beta(t) + \Phi\beta(t+\tau)]]dt - \\ & \left. - \pi\lambda\sigma_\alpha R_\tau \int_0^T \int_0^T z(t)z^*(t')\exp(-\nu|t-t'|)dt dt'\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражение (14) описывает фотодетектирование с произвольным временем задержки  $\tau$  в плече фазоманипулятора. Для случая прямого фотодетектирования ( $\tau = 0$ ) получим из (14)

$$\begin{aligned} Q_0(\lambda; \beta; \alpha) = & \int D^2z(t)\exp\left[-\pi\int_0^T |z(t)|^2 dt + \right. \\ & + 2i\sqrt{\pi\lambda}\int_0^T \operatorname{Re}[z^*(t)\beta(t)]dt - \\ & \left. - \pi\lambda\sigma_\alpha \int_0^T \int_0^T z(t)z^*(t')\exp(-\nu|t-t'|)dt dt'\right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Сопоставляя выражения (14) и (15), найдем

$$Q_\tau(\lambda; \beta; \alpha) = Q_0(\lambda R_\tau; \gamma_\tau(t); \alpha(t)), \quad (16)$$

где  $\gamma_\tau(t)$  — сигнал на выходе фазоманипулятора:

$$\gamma_\tau(t) = \frac{1}{2} [\beta(t) + \Phi\beta(t+\tau)].$$

Таким образом, статистическая структура фотоотсчетов в случаях  $\tau \neq 0$  и  $\tau = 0$  одинаковая, поскольку они описываются в терминах аналогичной производящей функции. Используя ранее найденный результат [2] для  $Q_0(\lambda; \beta; \alpha)$ , найдем окончательно

$$\begin{aligned} Q_\tau(\lambda; \beta; \alpha) = & \frac{4\rho\nu\exp(\nu T)}{\rho_+^2\exp(\rho T) - \rho_-^2\exp(-\rho T)} \times \\ & \times \exp\left\{-\lambda\int_0^T |\gamma_\tau(t)|^2 dt + \frac{\lambda^2\sigma_\alpha R_\tau/\rho}{\rho_+^2\exp(\rho T) - \rho_-^2\exp(-\rho T)} \times \right. \\ & \times \int_0^T \int_0^T [\rho_+^2\exp(\rho t) + \rho_-^2\exp(-\rho t)] [\rho_+\exp(\rho(T-t')) + \\ & \left. + \rho_-\exp(-\rho(T-t'))]\operatorname{Re}[\gamma_\tau(t)\gamma_\tau^*(t')]dt dt'\right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\rho = (\nu^2 + 2\lambda\nu\sigma_\alpha R_\tau)^{1/2}, \quad \rho_+ = \rho + \nu, \quad \rho_- = \rho - \nu.$$

В случае, когда несущая частота  $\omega_\beta$  когерентного сигнала и центральная частота спектра  $\omega_\alpha$  нормального шума разнесены, результат (17) остается в силе, если под  $R_\tau$  и  $\gamma_\tau(t)$  понимать

$$\begin{aligned} R_\tau = & \frac{1}{2} [1 + \cos(\omega_\alpha\tau)\exp(-\nu\tau)], \\ \gamma_\tau(t) = & \frac{1}{2} [\beta(t) + \beta(t+\tau)\exp(i\omega_\beta t)]\exp(i\omega_\beta t - i\omega_\alpha t). \end{aligned} \quad (18)$$

Найденные выражения (17), (18) имеют место для когерентного излучения с произвольной зависимостью его комплексной амплитуды  $\beta(t)$ . Из них следует, что среднее число отсчетов равно

$$\langle m \rangle = -\frac{d}{d\lambda} Q_\tau(\lambda; \beta; \alpha) \Big|_{\lambda=0} = \int_0^T |\gamma_\tau(t)|^2 dt + \sigma_\alpha^2 R_\tau T \quad (19)$$

и испытывает как функция  $\tau$  интерференционную модуляцию. Второй факториальный момент числа фотоотсчетов равен

$$\begin{aligned} \langle m(m-1) \rangle = & \frac{d^2}{d\lambda^2} Q_\tau(\lambda; \beta; \alpha) \Big|_{\lambda=0} = \\ & = \frac{\sigma_\alpha^2 R_\tau^2}{2\nu^2} [-1 + 2\nu T + \exp(-2\nu T)] + \\ & + 2\sigma_\alpha^2 R_\tau \int_0^T \int_0^T [\gamma_\tau(t)\gamma_\tau^*(t') + \gamma_\tau^*(t)\gamma_\tau(t')]\exp[-\nu(t-t')]dt dt'. \end{aligned} \quad (20)$$

Отсюда вытекает для дисперсии числа фотоотсчетов

$$\begin{aligned} \Delta = & \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 = \\ = & \langle m \rangle + \frac{\sigma_\alpha^2 R_\tau^2}{2\nu^2} [-1 + 2\nu T + \exp(-2\nu T)] + \\ & + 4\sigma_\alpha^2 R_\tau \int_0^T \int_0^T \operatorname{Re}[\gamma_\tau(t)\gamma_\tau^*(t')]\exp[-\nu(t-t')]dt dt'. \end{aligned} \quad (21)$$

Второе слагаемое в выражении для дисперсии  $\Delta$  определяется наличием шумового компонента поля излучения. Последнее слагаемое в выражении (21) связано с интерференцией между сигнальным и шумовым излучением. В случае низкоинтенсивной помехи именно оно определяет отличие распределения отсчетов от пуассоновского, для которого  $\Delta = \langle m \rangle$  (первое слагаемое). Заметим также, что в терминах величин  $\varphi_\tau$ ,  $\Phi_\tau$ ,  $R_\tau$  можно описать как фазовую модуляцию сигнала во времени, так и частотную. Эффективность модуляции, а значит качество приема, зависит от ширины линии шума и длительности сигнала. Если частоты  $\omega_\alpha$  и  $\omega_\beta$  разнесены, третье слагаемое в (21) быстро умень-

шается из-за осцилляций подынтегрального выражения.

### КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ПРИЕМА

Проблема помехоустойчивости становится особенно актуальной при  $\omega_\alpha = \omega_\beta$ . Имея в виду предельные возможности [4], примем, что  $\omega_\alpha = \omega_\beta = \omega$ , а также, что среднее число отсчетов  $\langle m \rangle = \sigma_c T$  шумового происхождения равно единице. Для сигнального оптического излучения примем, что за временной интервал передачи символа  $T$  оно монохроматично и постоянно по амплитуде, т. е.  $\beta(t) = \beta_c$ . Тогда среднее число сигнальных отсчетов на выходе интерферометра равно  $\langle m_c \rangle = \sigma_c T$ , где  $\sigma_c = |\beta_c|^2$ . В качестве символов передачи используем сигналы бинарного типа с фазовой манипуляцией на  $\pi$ , прием которых основан на фазоразностном методе: при совпадении начальных фаз двух последующих световых импульсов принимается символ «1», несовпадению начальных фаз отвечает символ «0». Очевидно, что задержка в одном из плеч интерферометра должна совпадать с длительностью символа  $T$ . Априорные вероятности передачи символов «1» и «0» примем одинаковыми и равными 0.5.

Численное нахождение значений производных согласно (2) удобно выполнять, если воспользоваться интегральной формулой Коши для вероятности  $P(m)$  зарегистрировать  $m$  отсчетов

$$P(m) = \frac{1}{2\pi i} \frac{(-1)^m}{m!} \frac{d^m}{d\lambda^m} \oint \frac{dz}{z-\lambda} Q_\nu(z; \beta; \alpha) \Big|_{\lambda=1},$$

что приводит к удобному для вычислений выражению

$$P(m) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\pi}^{\pi} \exp(im\eta) Q_\nu[1 + \exp(-i\eta); \beta; \alpha] d\eta, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

На рис. 2 приведены распределения вероятностей отсчетов  $P(m)$  для различных интенсивностей когерентного сигнала и  $\langle m_w \rangle = 1$ , номер интерференционного максимума  $n = 0$ .

На рис. 3 приведены значения вероятности  $P_{\text{ ошиб}} P_{\text{ ошиб}}$  ошибочного приема, рассчитанные по формуле

$$P_{\text{ ошиб}} = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^M P(m; \varphi_i = 0) + \frac{1}{2} \sum_{m=M+1}^{\infty} P(m; \varphi_i = \pi). \quad (23)$$

Здесь  $P(m; \varphi_i)$  — значения вероятности регистрации  $m$  отсчетов согласно (5), (17), (18) при различ-

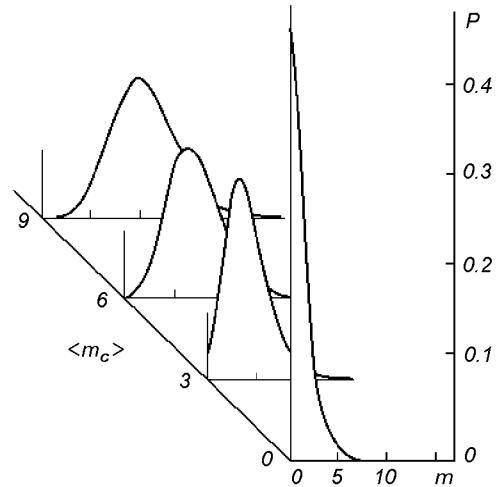


Рис. 2. Распределение фотоотсчетов;  $T = 10^{-10}$  с;  $\nu = 10^{10}$  Гц;  $\langle m_w \rangle = 1$ ;  $\omega = 3 \cdot 10^{15}$  Гц

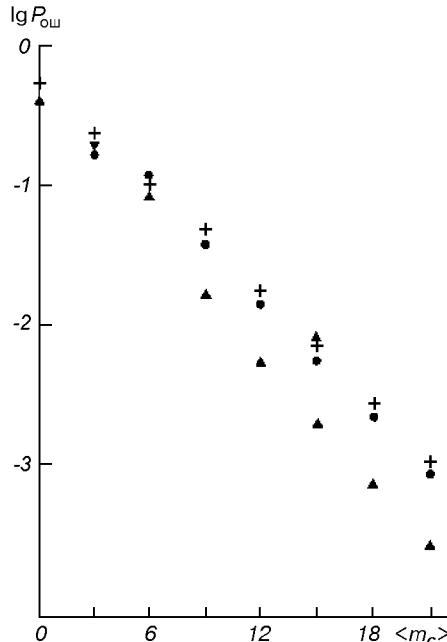


Рис. 3. Вероятности  $P_{\text{ ошиб}}$  ошибочного приема бинарных сигналов при  $T = 10^{-10}$  с,  $\langle m_w \rangle = 1$ ,  $\omega = 3 \cdot 10^{15}$  Гц. Крестики —  $v = 10^9$  Гц, точки —  $v = 10^{10}$  Гц, треугольники —  $v = 10^{11}$  Гц

ных фазах  $\varphi$  модуляции;  $M$  — пороговое значение числа отсчетов, определенное из условия максимума правдоподобия [5].

Из рис. 3 следует, что с уменьшением ширины линии  $\nu$  шумового излучения вероятность ошибки  $P_{\text{ ошиб}}$  увеличивается. С дальнейшим сужением ширины линии (при фиксированном интервале  $T$ ) веро-

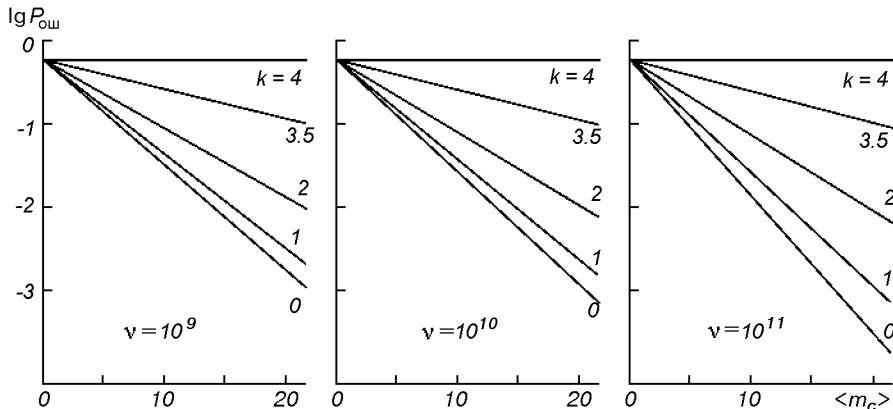


Рис. 4. Вероятности  $P_{\text{ош}}$  ошибочного приема для различных разностей фаз  $\varphi_{\tau}$  между двумя последовательными сигналами (цифрами у кривых указан параметр  $k$ ),  $\varphi_{\tau} = \pi(1+k/4)$ ,  $T = 10^{-10}$  с,  $\omega = 3 \cdot 10^{15}$  Гц

ятность ошибки изменяется незначительно, приближаясь к асимптотике

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{1}{2} \exp(-0.28\langle m_{\text{ш}} \rangle). \quad (24)$$

Коэффициент (показатель спада в (24)) уменьшается с увеличением  $\langle m_{\text{ш}} \rangle$ , т. е.  $P_{\text{ош}}$  при этом увеличивается. Так, для  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 2$  и  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 3$  он равен 0.21 и 0.17 соответственно. При этом для обеспечения значения вероятности  $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$  необходимое число  $\langle m_c \rangle$  сигнальных отсчетов оказалось равным 18 для  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 0.01$ , 22 для  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 1$  и 38 для  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 2$  (при  $\nu = 10^8$  Гц,  $T = 10^{-9}$  с).

Вариация длительности временной задержки  $\tau$  между интерферирующими лучами на входе в приемник интенсивность светового поля обуславливает различную модуляцию для его сигнальной и шумовой составляющих. Если когерентное монохроматическое излучение модулируется по закону косинуса, то пространственное распределение интенсивности шума в области локализации интерференционной картины определяется его функцией когерентности [1]. На парциальные интерференционные картины накладывается взаимодействие компонентов оптического излучения; хотя в первом моменте, согласно (19), это взаимодействие не проявляется, оно дает вклад во все четные моменты статистики фотоотсчетов. Этот вклад многопараметричен, в частности, он зависит как от  $\cos(\omega_{\alpha}\tau)$ , так и от  $\cos(\omega_{\beta}\tau)$ , если  $\omega_{\beta} \neq \omega_{\alpha}$ .

На рис. 4 приведены зависимости вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  для различных разностей фаз  $\varphi_{\tau} = \pi(1 + k/4)$  при  $k = 0, 1, 2, 3.5, 4$  между двумя последовательными символами в случае передачи символа «0». При выбранных параметрах и  $k = 4$  ошибка достигает максимума, равного 0.5; с дальнейшим изменением параметра  $k$  от 4 до 8 зависи-

мости  $P_{\text{ош}}$  повторяют приведенные на рис. 4 кривые.

Из рис. 3—4 можно сделать вывод, что уменьшение ширины спектрального контура линии  $\nu$  или уменьшение спектрального интервала  $\Delta\omega = |\omega_{\alpha} - \omega_{\beta}|$  между сигнальным и шумовым излучением приводит к увеличению вероятности ошибочного приема  $P_{\text{ош}}$  при любых  $\tau$  и любых  $\langle m_{\text{ш}} \rangle$  и  $\langle m_c \rangle$ .

#### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ

Рассмотрим простой пример, поясняющий энергетику приема. Пусть при стандартной скорости передачи информации  $I$  требуется найти мощность полезного сигнала на входе приемника  $P_c$  и допустимую мощность шума  $P_{\text{ш}}$ , обеспечивающих выполнение условия  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-3}$ . Зададимся  $I = 565$  Мбит/с, тогда тактовая частота посылки символов  $F_t = 565^{-1} \cdot 10^6$  Гц, откуда длительность символа составляет  $\tau = F_t^{-1}$ . Далее зададимся следующим условием на вероятность ошибки  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-3}$  и выберем из рис. 3 средние значения  $\langle m_c \rangle = 21$ ,  $\langle m_{\text{ш}} \rangle = 1$ .

Отсюда находим мощности сигнала  $P_c$  и шума  $P_{\text{ш}}$  по формулам

$$\langle m_c \rangle = \frac{\eta_e \tau P_c}{\hbar \omega}, \quad \langle m_{\text{ш}} \rangle = \frac{\eta_e \tau P_{\text{ш}}}{\hbar \omega},$$

где  $\eta_e$  — квантовая эффективность фотодетектора,  $\hbar$  — постоянная Планка. При  $\eta = 0.7$  и  $\omega = 1.45 \cdot 10^{15}$  Гц получим  $P_c = 81.2 \cdot 10^{-16}$  Вт и  $P_{\text{ш}} = 3.9 \cdot 10^{-16}$  Вт. При учете дальности трассы оптической связи найденное в месте приема значение  $P_c$  необходимо пересчитать.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе предложена статистическая теория отсчетов при регистрации интерференционной картины, образованной суперпозицией когерентного и шумового (нормального марковского) оптических полей. Особое внимание уделено низкоинтенсивным оптическим полям (с числом сигнальных отсчетов порядка 20), реализующимся при приеме/передаче на сверхбольшие расстояния. Изучены ошибки, возникающие при передаче бинарных символов фазоразностным методом, обусловленные как наличием помехи, так и квантовой структурой рассматриваемого процесса, проявляющейся при столь низких интенсивностях. Прослежено влияние на помехоустойчивость передачи символов параметров шума (ширины линии) и условий фазоразностной модуляции. Полученные выражения можно использовать при синтезе систем связи на больших дальностях космических трасс, нацеливания и вхождения в связь объектов, снабженных системами сканирования лучей ОКГ.

1. Глаубер Р. Оптическая когерентность и статистика фотонов // Квантовая оптика и квантовая радиофизика. — М.: Мир, 1966.—С. 91—230.
2. Мазманишвили А. С. Континуальное интегрирование как метод решения физических задач. — Киев: Наук. думка, 1987.—224 с.
3. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. — М.: Сов. радио, 1977.—488 с.
4. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. — М.: Мир, 1968.—383 с.
5. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи. — М.: Связь, 1977.—264 с.

---

## RECEIVING PHASE-KEYED OPTICAL SIGNALS VIA QUANTUM DETECTOR

A. S. Mazmanishvili

The statistics of photocounts of phase-keyed optical signal with normal Markovian noise is studied. Generating function of photocounts of additive radiation field is found. Numerical characteristics of photocount distribution and the probability of wrong detection decision are obtained. The error probability is shown increase with decreasing spectral profile width of the noise line.

УДК 629.07.54

## О погрешности курсоуказания ракет-носителей

В. В. Каракун, Е. Р. Потапова, В. Н. Мельник, А. Б. Астапова

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

*Надійшла до редакції 08.07.99*

Аналізується механізм пружної взаємодії акустичного випромінювання рушійних установок РН з приладом курсу на базі триступеневого астатичного гіроскопа.

Для построения ориентирных направлений на ракетах-носителях, в частности при решении вопросов курсоуказания, широкое применение находят трехстепенные свободные гироскопы на базе астатических приборов. В совокупности с другими измерителями механических величин эти устройства являются также комплектующими элементами командно-измерительных комплексов РН. Для управления полетом баллистических ракет используют сочетание двух свободных гироскопов и гироскопического интегратора продольных ускорений ракеты. Один из них, так называемый вертикалант, контролирует углы поворота ракеты вокруг двух ортогональных осей (продольной и поперечной, в плоскости шпангоута). Другой свободный гироскоп — горизонт — обеспечивает программное изменение угла тангенса. У первого ось наружной рамки устанавливается в плоскости траектории движения ракеты, у второго — перпендикулярно к плоскости траектории, а ось фигуры располагается горизонтально. Собственный уход их не превышает 5...7 угловых минут в минуту времени.

Как показали натурные испытания носителей типа «Энергия», курсовой прибор на базе трехстепенного свободного гироскопа в условиях высоких уровней акустического излучения (160 дБ и выше), наблюдающихся, в частности, при старте носителей, имеет систематический дрейф оси фигуры в азимуте, достигающий по истечении определенного времени таких значений, когда происходит удар подвижной части об упоры, теряется одна степень

свободы гироскопа и, по сути дела, прибор выходит из строя [1].

Механизм упругого взаимодействия волны акустического давления с гироскопом объясняется с помощью приведимой ниже схемы (рис. 1, 2).

Проанализируем вначале влияние звукового излучения на наружную рамку (рис. 1). Пусть равнодействующая сил избыточного давления на ее вертикальные плоскости равна  $F$  и, кроме того, на противоположных сторонах они находятся в противофазе (наиболее неблагоприятный случай). Представив эти силы в виде составляющих, обнаруживаем, что силы  $F_1$ ,  $F_2$  параллельны оси внутренней рамки и не создают момента-помехи, а система сил  $F_2$ ,  $F_2$  составляет пару с моментом  $M_2$ , вектор которого направлен вдоль оси наружной рамки. В соответствии с теоремой Резаля в этом случае ось фигуры будет прецессировать относительно оси внутренней рамки вверх. Имеющаяся межрамочная, либо маятниковая, коррекция должна нивелировать данное движение и исключать его вредное влияние.

Воздействие акустической волны на горизонтальные плоскости наружной рамки гироагрегата (ГА) не приводит к возникновению момента относительно внутренней оси подвеса, так как подшипники наружной оси жестко соединены с корпусом носителя и такой поворот невозможен. Это воздействие может привести лишь к появлению дополнительного давления на ось и к увеличению сил сухого трения.

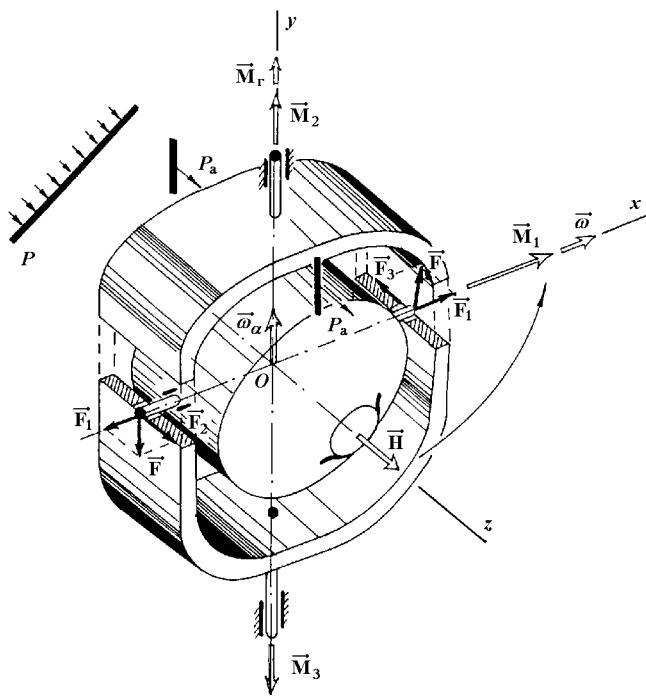


Рис. 1. Механизм взаимодействия акустической волны с гироскопом направления

Механизм влияния звуковой волны на кожух (внутреннюю рамку) гироскопа гораздо сложнее, и для его пояснения требуется несколько иной подход. Если представить звуковое давление как сумму антисимметричной  $P_a$  и симметричной  $P_c$  составляющих, то становится очевидным, что именно первая представляет наибольшую опасность, так как стремится повернуть кожух относительно внутренней оси подвеса, создавая при этом момент  $M_1$  (рис. 1). Вследствие этого ось фигуры будет прецессировать влево до совмещения векторов кинетического момента  $H$  и  $M_1$ , что приведет к появлению акустической девиации.

В соответствии с теоремой об изменении кинетического момента в форме Резаля имеем

$$\omega_a \times H = M_1, \quad (1)$$

где  $\omega_a$  — угловая скорость прецессии гироскопа относительно оси наружной рамки. Отсюда величина дрейфа оси гироскопа направления равна

$$\omega_a = \frac{M_1}{I\Omega \sin(\omega_a, H)}, \quad (2)$$

где  $I$  — момент инерции гироскопа относительно главной оси;  $\Omega$  — угловая скорость вращения ротора.

Остается раскрыть содержание момента-помехи  $M_1$ . Можно предположить отсутствие иных вредных моментов на оси  $Ox$ , кроме  $M_1$ , поскольку кожух проходит тщательную статическую и динамическую балансировку при сборке прибора.

Пусть внутри приборного отсека распространяется волна давления с потенциалом скорости

$$\Phi = \Phi(\xi) = \exp(i\omega t - k\xi \cos\theta), \quad (3)$$

фронт которой в момент времени  $t = 0$  соприкасается с поверхностью исходно неподвижного кожуха гироагрегата. Функцию  $\Phi(\xi)$  будем предполагать стремящейся к некоторому пределу при  $\xi \rightarrow \infty$ , что позволяет ввести допущение об ограниченной величине полного импульса давления:

$$\int_0^\infty P dt = -\rho \int_0^\infty \frac{\partial \Phi}{\partial t} dt = \text{const.}$$

В формуле (3) через  $\omega$  обозначена круговая частота падающей волны,  $k$  — волновое число,  $\xi$  — направление распространения излучения,  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности и перпендикуляром к фронту волны.

Антисимметричная составляющая акустического давления создает момент  $M_1$  относительно оси внутренней рамки, однако гироскоп прецессирует относительно оси наружной рамки. Кроме того, будет возникать и момент  $M_3$ , значение которого раскроем ниже (рис. 1). Величина момента  $M_1$  определяется соотношением

$$\begin{aligned} M_1 &= M_x = \\ &= \rho \int_S y \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) dS - \rho \int_S y \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) dS - \\ &\quad - \rho \int_S z \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) dS - \rho \int_S z \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) dS, \end{aligned} \quad (4)$$

а момента  $M_3$  — формулой

$$\begin{aligned} M_3 &= M_z = \\ &= \rho \int_S x \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) dS + \rho \int_S x \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) dS - \\ &\quad - \rho \int_S y \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cos(n_x, \xi) dS - \rho \int_S y \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cos(n_x, \xi) dS. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $x, y, z$  — координаты точки приложения равнодействующей сил акустического давления в полуподвижной системе координат,  $\rho$  — плотность воздуха,  $n_j$  — проекции нормали к поверхности  $S$  кожуха на соответствующую ось. Потенциал  $\varphi$  подчиняется трехмерному волновому уравнению Лапласа

$$\Delta\varphi - c^{-2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0$$

и начальным условиям

$$\varphi|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial t}|_{t=0} = 0.$$

При  $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \rightarrow \infty$  функция  $\varphi \rightarrow 0$ , а на поверхности кожуха имеет место условие [2]

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = -\frac{\partial\Phi}{\partial n} + \frac{\partial U(t)}{\partial t} \cos(\hat{n}_j, j),$$

где  $U(t)$  — скорость точки поверхности.

Для конкретности падающую монохроматическую волну давления можно задать в виде

$$P = P_{10}(\xi) = \exp(i(\omega t - k\xi \cos\theta)),$$

а потенциалы скоростей падающей и дифракционной волн — соотношениями

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{\rho} \int_0^t P dt = \frac{1}{i\omega\rho} P_{10} \exp(i(\omega t - k\xi \cos\theta)) = \\ &= \Phi_0 \exp(i(\omega t - k\xi \cos\theta)), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\varphi = \varphi_0 \exp(i(\omega t - k\xi \cos\theta')),$$

где

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{C_2}{C_1} \sin\theta\right)$$

— угол преломления, определяемый из закона Снеллиуса (равенство фазовых скоростей распространения волн вдоль границы воздух—поверхность кожуха ГА),  $\Phi_0 = \varphi_0 = P_{10}/(i\omega\rho)$ ,  $P_{10}$  — давление в падающей волне. Тогда формулу (2) можно раскрыть более полно:

$$\begin{aligned} \omega_a &= \frac{\rho}{I\Omega \sin(\omega_a, H)} \times \\ &\times \int_S \left[ y \frac{\partial\Phi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) + y \frac{\partial\varphi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) - \right. \\ &\left. - z \frac{\partial\Phi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) - z \frac{\partial\varphi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) \right] dS, \end{aligned} \quad (7)$$

а угол дрейфа оси фигуры определить интегрированием выражения (7):

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \frac{\rho}{I\Omega} \int_0^t \frac{1}{\sin(\omega_a, H)} \times \\ &\times \int_S \left[ y \frac{\partial\Phi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) + y \frac{\partial\varphi}{\partial t} \cos(n_z, \xi) - \right. \\ &\left. - z \frac{\partial\Phi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) - z \frac{\partial\varphi}{\partial t} \cos(n_y, \xi) \right] dS dt, \end{aligned} \quad (8)$$

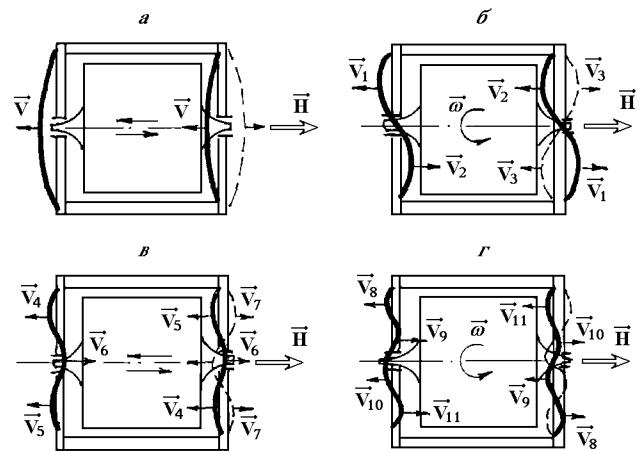


Рис. 2. Влияние прогибов крышек кожуха на акустическую девиацию

Очевидно, что величина акустической девиации гироагрегата увеличивается во времени и может достигать значительных величин при длительном воздействии звукового излучения высокого уровня.

С другой стороны, в условиях высокого акустического давления со стороны ракетных двигателей носителя на динамику гироскопа, будут оказывать влияние и другие элементы конструкции кожуха. В частности, торцевые пластины, в которых установлены подшипники главной оси. Механизм этого явления проясняется, если рассмотреть низкие формы изгибных колебаний торцов кожуха (рис. 2). Ограничимся для конкретности первыми четырьмя. При синфазном изгибном движении, первая форма, как следует из схемы, не может вызвать принудительного поворота кожуха относительно оси, перпендикулярной к главной оси (рис. 2, a — сплошная линия). Аналогично и при противофазном прогибе (штриховая линия). В этом случае возможны перемещения ротора вдоль главной оси, приводящие к нагрузке подшипников, но не к вынужденной пресцессии оси фигуры.

Совершенно иная картина наблюдается на второй форме (рис. 2, б). При синфазном колебании крышек кожуха (сплошная линия) перемещения нижнего края правой и верхнего края левой пластины со скоростью  $V_1$  вызывают принудительное движение ротора со скоростью  $\omega$ . Скорости  $V_2$  точек поверхности торцов также стремятся повернуть ротор в ту же сторону и с той же угловой скоростью  $\omega$ . Наличие принудительной угловой скорости, как известно, приведет к появлению гироскопического момента

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{H} \times \boldsymbol{\omega},$$

направленного вдоль оси наружной рамки и стремящегося установить ось фигуры гироскопа параллельно вектору  $\omega$  (рис. 1). Понятно, что прецессия вокруг оси наружной рамки есть дрейф прибора в азимуте и представляет собой акустическую девиацию. Аналогичная картина наблюдается на третьей и четвертой форме (рис. 2, в, г). Таким образом, нечетные формы акустической вибрации торцов кожуха приводят к принудительному поступательному перемещению ротора и не представляют опасности, а четные — к принудительному повороту ротора гироскопа вокруг оси, перпендикулярной к вектору кинетического момента  $\mathbf{H}$ . Последнее обстоятельство и служит причиной погрешности курсоказания гироагрегата.

1. Каракун В. В., Лозовик В. Г. О влиянии акустического излучения на динамику чувствительных элементов ГСП // Космічна наука і технологія.—1996.—1, № 2-6.—С. 72—75.
2. Новожилов В. В. О перемещении абсолютно твердого тела под действием акустической волны давления // Прикл. матем. и мех.—1959.—23, вып. 4.—С. 794—797.

---

#### ON THE FAULT IN THE COURSE INDICATION OF CARRIER ROCKET

V. V. Karachun, E. R. Potapova, V. N. Mel'nik,  
and A. B. Astapova

We study the mechanism of resilient interaction of the acoustic radiation from carrier rocket engines with the course devices built around a three-degree astatic gyro.

УДК 681.326.7

# Методы бортовых с многопараметрической управляющих раздельным адаптации и вычислительных мажоритарным систем резервированием

**В. С. Харченко, А. П. Зенин, В. В. Скляр**

Харківський військовий університет

*Надійшла до редакції 03.08.99*

Узагальнено архітектуру бортових управляючих і обчислювальних систем з роздільним мажоритарним резервуванням, в яких як адаптивні параметри використовуються не тільки порогова функція відновлюючого органу, але і кількість ярусів резервування, і кількість програмних версій (варіантів). Приведені результати досліджень систем, в яких реалізуються методи ярусно-порогової і ярусно-версійно-порогової адаптації.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема вводимой избыточности (структурной, программной и др.) в целях обеспечения отказоустойчивости управляющих и вычислительных систем (УВС) может дать требуемый эффект, если оно сопровождается разработкой адекватных процедур реконфигурации, учитывающих ограничения временного, стоимостного и другого характера. Это особенно важно для бортовых УВС космических аппаратов, которые работают в реальном масштабе времени и являются, как правило, необслуживаемыми или частично обслуживаемыми системами [5]. Высокие требования по их безотказности могут быть выполнены путем увеличения числа участков резервирования (ярусов) или резервируемых компонентов и введения развитых средств диагностирования и реконфигурации. В то же время поиск работоспособных конфигураций должен осуществляться достаточно быстро, несмотря на то, что их количество связано с числом ярусов показательной зависимостью [11]. Кроме того, это противоречие обостряется двумя обстоятельствами. Во-первых, усложнение процедур реконфигурации со-

проводится увеличением объема и снижением безотказности соответствующих средств и УВС в целом. Во-вторых, раздельное резервирование практически исключает возможность использования версионной избыточности в многоверсионных архитектурах, устойчивых к дефектам проектирования программных средств [11].

Разрешение указанного противоречия возможно путем совершенствования механизмов адаптации архитектур отказоустойчивых УВС, обзор которых дан в [8, 13]. В наиболее распространенных УВС с мажоритарной архитектурой используются управляемые восстанавливающие органы, пороговая характеристика которых изменяется в зависимости от числа отказавших каналов [3]. В данной статье предлагается увеличить множество адаптивных параметров и таким образом расширить пространство поиска решений, удовлетворяющих требованиям к системам данного класса. К числу основных требований относятся требования безотказности системы, определяемые, как правило, величиной вероятности безотказной работы (или ее аналога — вероятности правильного функционирования при учете ненадежности программных средств). В качестве

ограничений должны учитываться, прежде всего, ограничения, диктуемые реальным масштабом времени функционирования, — допустимой продолжительностью диагностирования и реконфигурации архитектуры, а также ограничения на габаритомасковые характеристики. Далее рассматриваются УВС с мажоритированием двух типов (одноверсионные и многоверсионные системы (МВС), обладающие свойствами устойчивости к физическим дефектам аппаратных средств (ДФ-устойчивости), дефектам проектирования программных средств (ДП-устойчивости) и общей дефектоустойчивости (Д-устойчивости). При этом используются основные понятия и результаты, изложенные в работе [6]. В частности, под версией понимается эквивалентный программный (программно-аппаратный) вариант выполнения функций.

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УВС С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему  $\tilde{S}$ , характеризующуюся множеством параметров  $M\Pi_{\tilde{S}}$ , которые могут изменяться в процессе функционирования. К их числу отнесем общее число версий  $e$ , число нетривиальных (нетождественных) версий  $e_{\bar{T}}$ , порог срабатывания мажоритара  $e_{\Pi}$ , число ярусов резервирования  $k$  и др.

Если в процессе функционирования системы при отказах элементов компонентов ее версий работоспособность сохраняется путем изменения значения одного из параметров  $\Pi_1 \in M\Pi_{\tilde{S}}$ , будем называть ее системой с однопараметрической адаптацией, а соответствующий параметр — адаптивным. Системы с однопараметрической адаптацией по порогу  $e_{\Pi}$  срабатывания восстанавливающего органа исследованы в [7]. Порог  $e_{\Pi} = 1, \dots, (e + 1)/2$  является функцией числа отказавших версий  $e_d$ . Функцию  $e_{\Pi} = f(e_d)$  назовем функцией адаптации.

Если в процессе функционирования изменяется два и более параметров из множества  $M\Pi_{\tilde{S}}$ , назовем такие системы системами с многопараметрической адаптацией. Следовательно,

$$M\Pi_{\tilde{S}} = M\Pi_{\tilde{S}}^A \cup M\Pi_{\tilde{S}}^{\bar{A}}, \quad M\Pi_{\tilde{S}}^A \cap M\Pi_{\tilde{S}}^{\bar{A}} = \emptyset,$$

где  $M\Pi_{\tilde{S}}^{A(\bar{A})}$  — множество адаптивных (неадаптивных) параметров. Для систем с многопараметрической адаптацией (МПА)  $\text{card}M\Pi_{\tilde{S}}^A \geq 2$ . Таким образом, каждая система с МПА характеризуется множеством  $M\Pi_{\tilde{S}}^{A(\bar{A})}$  и множеством функций адаптации  $Mf^A$  для всех  $\Pi_1 \in M\Pi_{\tilde{S}}^A$ .

Проанализируем возможные варианты систем с многопараметрической адаптацией.

1. Одноверсионные системы с ярусно-пороговой адаптацией,  $S_{T1}^{2A}$ , для которых

$$\begin{cases} M\Pi_{\tilde{S}}^A = \{e_{\Pi}, k\}, & k = 1, \dots, k_{\Phi}, \quad e_{\bar{T}} = 0, \\ e_{\Pi} = f_{\Pi}^A(e_d), & k = f_k^A(e_d, r_{\varphi}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_{\varphi}$  — булева переменная, определяемая режимом функционирования системы, причем  $r_{\varphi} = 0$  при выполнении  $\varphi_i \in \Phi$  и  $r_{\varphi} = 1$  при поиске работоспособных конфигураций;  $k_{\Phi}$  — число ярусов, определяемых безотказностью аппаратного компонента по физическим дефектам.

2. Многоверсионные системы с ярусно-версионной адаптацией  $S_{T1}^{2A}$ , такие что

$$\begin{cases} M\Pi_{\tilde{S}}^A = \{e_{\bar{T}}, k\}, \\ e_{\bar{T}} = \begin{cases} e_{\bar{T}0}, & \text{если } e_d \leq e - e_{\Pi}, \\ 0, & \text{если } e_d > e - e_{\Pi}, \end{cases} \\ k = \begin{cases} 1, & \text{если } e_d \leq e - e_{\Pi}, \\ (> 1) \& (\leq k'_{\Phi}), & \text{если } e_d > e - e_{\Pi}, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$e_{\bar{T}0}$  — начальное значение параметра  $e_{\bar{T}}$  в системе.

Варьирование значениями параметров  $e_{\bar{T}}$  и  $k$  позволяет сохранить конфигурацию нетривиальной системы до отказа элементов аппаратного компонента одной или нескольких ( $e_d \leq e - e_{\Pi}$ ) версий. Функция адаптации для параметра  $k$  может зависеть также от параметра  $r_{\varphi}$ .

Если возможна совместная декомпозиция программного и аппаратного компонентов на  $k_{\Pi} \leq k_{\Phi}$  ярусов, то функция адаптации  $f_k^A$  выглядит следующим образом:

$$k = \begin{cases} k_{\Pi}, & \text{если } e_d \leq e - e_{\Pi}, \\ (> k_{\Pi}) \& (\leq k'_{\Phi}), & \text{если } e_d > e - e_{\Pi}, \end{cases} \quad (3)$$

Системы такого типа будем обозначать  $\tilde{S}_{T2}^{2A}$ .

3. МВС-системы с ярусно-версионно-пороговой адаптацией  $\tilde{S}_{T1}^{3A}, \tilde{S}_{T2}^{3A}$ , для которых  $M\Pi_{\tilde{S}}^A = \{e_{\Pi}, e_{\bar{T}}, k\}$ . Функции адаптации параметров  $e_{\Pi}, e_{\bar{T}}, k$  аналогичны рассмотренным выше для систем  $S_{T1}^{2A}$  и  $S_{T2}^{2A}$ .

Исследование различных вариантов систем с многопараметрической адаптацией включает в себя ряд частных задач:

а) оптимальная декомпозиция версий в одноверсионных системах на ярусы по показателю безотказности аппаратных компонент с учетом характеристик средств диагностирования и реконфигурации — ДФ-декомпозиция;

б) анализ целесообразности варьирования ярусности версий в зависимости от ограничений на время реконфигурации;

в) оценка эффекта, получаемого при варьировании ярусности в МВС;

г) разработка научно-методического аппарата совместной надежностной и содержательной декомпозиции версий систем, описываемых различными математическими моделями.

Остановимся на результатах решения первых трех задач применительно к мажоритарным МВС, поскольку четвертая задача носит самостоятельный характер [12]. При этом следует учесть, что:

1) вероятность правильного функционирования является возрастающей функцией числа ярусов на всем интервале от 1 до  $k$  только при идеальных средствах выполнения функции мажоритаризации  $\xi$ . Кроме того, возможности увеличения  $k$  ограничиваются архитектурными и технологическими особенностями элементной базы;

2) с увеличением числа ярусов  $k$  может существенно увеличиваться время  $T_{pk}$  поиска работоспособных конфигураций МВС, на которое накладываются жесткие ограничения в системах реального масштаба времени;

3) интервал времени, на котором многие типы МВС имеют преимущество в Д-устойчивости перед одноверсионными системами, ограничен [11];

4) аппаратные компоненты операционной среды, в которой реализуются различные версии, могут быть идентичными.

### 3. ДФ-ДЕКОМПОЗИЦИЯ МАЖОРИТАРНЫХ УВС

Получим решение задачи ДФ-декомпозиции для трехканальных мажоритарных систем двух типов — с централизованным и децентрализованным управлением средствами контроля и реконфигурации ( $S_T^H$  и  $S_T^D$ ), которое, в отличие от известных [4], позволяет учесть характеристики этих средств.

1. Исследуемые системы с централизованными средствами контроля и реконфигурации  $S_T^H$ .

Поскольку безотказность входных и выходных средств коммутации и значения вероятности непроявления (проявления) дефектов программных средств  $P_\Pi(Q_\Pi)$  не влияют на результат данной задачи, будем в дальнейшем ими пренебречь. Тогда для вероятности отказа систем  $S_T^H$  справедливо

$$\begin{aligned} Q(\tilde{S}_T^H) \approx & (1 - Q_{\xi_H})k [3Q_{\phi\phi}^2 - 2Q_{\phi\phi}^3 - 3Q_{\phi\phi}^2(1 - \\ & - Q_{\phi\phi})D_{\kappa\phi}] + Q_{\xi_H}k [P_{\phi\phi}^3 + 3P_{\phi\phi}^2(1 - P_{\phi\phi})] \times \\ & \times [3Q_{\phi\phi}^2 - 2Q_{\phi\phi}^3], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $D_{\kappa\phi}$  — вероятность достоверного контроля аппа-

ратного компонента;  $Q_{\xi_H}$  — вероятность отказа централизованных средств контроля и реконфигурации (общего ядра средств выполнения функции  $\xi$ );

$$P_{\phi\phi} = P_{\phi\phi}P_{\xi_H}, \quad Q_{\phi\phi} \cong Q_{\phi\phi} + Q_{\xi_H} \quad (5)$$

— вероятности безотказной работы и отказа аппаратных компонентов фрагмента (канала) яруса, причем  $P_{\phi\phi}$  ( $Q_{\phi\phi}$ ) — вероятность безотказной работы (отказа) собственно фрагмента,  $P_{\xi_H}$  ( $Q_{\xi_H}$ ) — вероятность безотказной работы (отказа) мажоритарного элемента (для систем с сетевым мажоритированием).

При справедливости экспоненциального закона выражение (5) преобразуется к виду

$$Q_{\phi\phi} \approx \left( \frac{n_\phi}{k} + n_{\xi_H} \right) \lambda_{\phi\phi} t, \quad (6)$$

$$P_{\phi\phi} \approx \left( 1 - \frac{n_\phi}{k} \lambda_{\phi\phi} t \right) \left( 1 - n_{\xi_H} \lambda_{\phi\phi} t \right), \quad (7)$$

где  $n_\phi$ ,  $n_{\xi_H}$ ,  $\lambda_{\phi\phi}$  — число элементов и интенсивность отказов.

Продифференцируем функцию  $Q(\tilde{S}_T^H) = f(k)$  по аргументу  $k$ , исключив слагаемые, содержащие величину  $(\lambda_{\phi\phi} t)^i$ ,  $i > 4$ , с учетом (4—7), а также того, что

$$Q_{\xi_H} \cong a_\Pi(1 + b_\Pi k) \lambda_{\phi\phi} t, \quad (8)$$

где  $a_\Pi$  и  $b_\Pi$  — соответствующие коэффициенты сложности средств контроля и конфигурации.

После ряда преобразований получим уравнение

$$k^3 + c_1 k + c_0 = 0, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= 3n_\phi^2(2\lambda_{\phi\phi}tn_{\xi_H} + D_{\kappa\phi} - 1)/(3n_{\xi_H}^2 - 2\lambda_{\phi\phi}tn_{\xi_H}^3), \\ c_0 &= 2\lambda_{\phi\phi}tn_\phi^3(2 - D_{\kappa\phi})/(3n_{\xi_H}^2 - 2\lambda_{\phi\phi}tn_{\xi_H}^3). \end{aligned}$$

Анализ дискриминанта уравнения (9) показывает, что оно имеет три действительных корня, причем только один из них не меньше единицы. Оптимальное значение  $k$  для систем  $\tilde{S}_T^H$  вычисляется по формуле

$$k_{opt}(\tilde{S}_T^H) = 2(n_\phi/n_{\xi_H}) \sqrt{\rho_1/\rho_2} \cos(\varphi/3), \quad (10)$$

где  $\varphi = f(\lambda_{\phi\phi}, t, n_{\xi_H}, D_{\kappa\phi})$ .

Результаты исследований функций (4) и (10) иллюстрируются рис. 1. Их анализ позволяет заключить, что:

а) величина  $k_{opt}(\tilde{S}_T^H)$  является возрастающей функцией от сложности версий  $n_\phi$ , убывающей

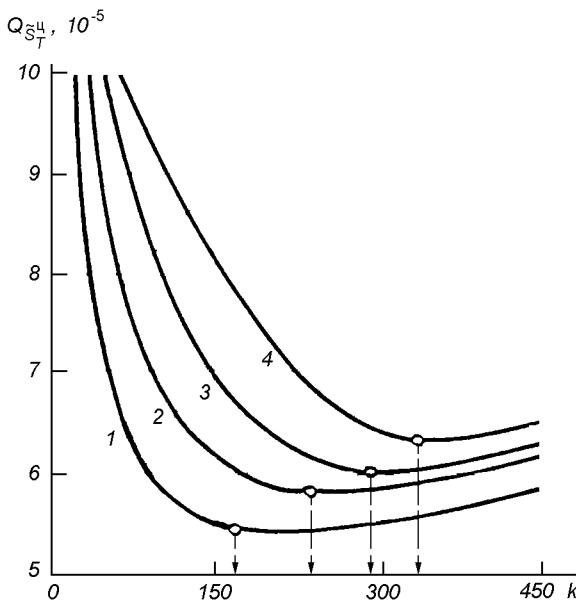


Рис. 1. Зависимости вероятности отказа систем  $\tilde{S}_T^{II}$  от числа ярусов при  $\lambda_{\phi\phi}t = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_\Pi = 1$ ,  $n_\phi = 1500$ ,  $n_{\xi\phi} = 2$ ,  $a_\phi = 50$ ,  $b_\phi = 0.001$ . Кривые 1–4 — для  $D_{k\phi} = 0.95, 0.9, 0.85$  и 0.8 соответственно

функцией от достоверности контроля  $D_{k\phi}$  и сложности мажоритарных элементов и практически не зависит от вероятности  $\lambda_{\phi\phi}t$  отказа элементов, на которых строится версия;

б) на участке  $k \in [1, k_{opt}]$  значения функции  $Q(S_{MT3}^{II})$  резко уменьшаются, а при  $k > k_{opt}$  медленно растут;

в) увеличение коэффициентов сложности ядра ( $a_\phi$ ) и оболочки ( $b_\phi$ ) средств контроля и реконфигурации ведут к увеличению вероятности отказа и вызванному этим незначительному увеличению величины  $k_{opt}$ .

2. Исследуем системы с децентрализованными средствами контроля и реконфигурации  $\tilde{S}_T^D$ . Каждый из ярусов имеет индивидуальные средства, которые могут быть реализованы в виде микропрограмматоров [9]. Вероятность их отказа вычисляется по формуле

$$Q_{\xi\phi} \approx \lambda_{\phi\phi}t \left( a_\phi + \frac{b_\phi}{k} \right), \quad (11)$$

где  $a_\phi$  и  $b_\phi$  — коэффициенты сложности, аналогичные коэффициентам  $a$  и  $b$  выражения (8).

Тогда вероятность отказа системы  $\tilde{S}_T^D$  определится следующим образом

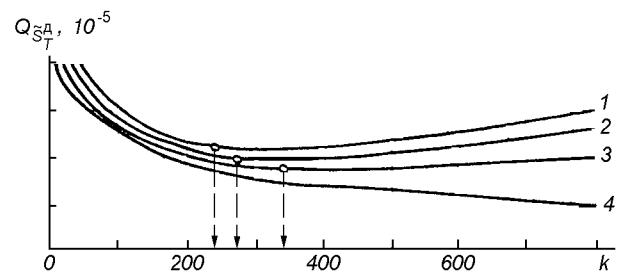


Рис. 2. Зависимости вероятности отказа систем  $\tilde{S}_T^D$  от числа ярусов  $k$  при  $\lambda_{\phi\phi}t = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_\Pi = 1$ ,  $n_\phi = 1500$ ,  $n_{\xi\phi} = 2$ ,  $b_\phi = 2$ ,  $n_{\xi\text{ДЦ}} = 5$ ,  $D_{k\phi} = 0.8$ . Кривые 1–4 — для  $Q_A = 3, 5, 7, 10$  соответственно

$$Q(\tilde{S}_T^D) \cong (1 - kQ_{\xi\phi})k [3Q_{\phi\phi}^2 - 2Q_{\phi\phi}^3 - 3Q_{\phi\phi}^2(1 - Q_{\phi\phi})D_{k\phi}] + kQ_{\xi\phi} [P_{\phi\phi}^3 + 3P_{\phi\phi}^2(1 - P_{\phi\phi})] \times [3Q_{\phi\phi}^2 - 2Q_{\phi\phi}^3] + Q_{\xi\text{ДЦ}}, \quad (12)$$

где  $Q_{\xi\text{ДЦ}}$  — вероятность отказа аппаратных компонентов, координирующих взаимодействие индивидуальных средств контроля и реконфигурации ярусов.

Целесообразность использования систем  $\tilde{S}_T^D$  (по сравнению с системами  $\tilde{S}_T^{II}$ ) определяется значением величины  $Q_{\xi\text{ДЦ}}$ . Исследования показывают, что приемлемые результаты могут быть получены при мажоритировании средств реализации  $\xi_{\text{ДЦ}}$ .

Анализ функции  $Q(\tilde{S}_T^D) = f(k)$  (рис. 2) показывает, что:

а) характер зависимости оптимального числа ярусов от параметров  $n_\phi$ ,  $n_{\xi\phi}$ ,  $D_{k\phi}$ ,  $\lambda_{\phi\phi}$ ,  $t$  в системах  $\tilde{S}_T^D$  аналогичен системам  $\tilde{S}_T^{II}$ ;

б) вероятность отказа системы  $\tilde{S}_T^D$  и результаты определения  $k_{opt}$  весьма чувствительны к вариации параметров индивидуальных средств контроля и реконфигурации, в частности значения  $a_\phi$ ;

в) усложнение мажоритарных органов в системах  $\tilde{S}_T^D$  в области минимальных значений вероятности отказа оказывает на него значительно меньшее влияние, чем в системах  $\tilde{S}_T^{II}$ , поэтому при увеличении разрядности выходной информации предпочтительность выбора систем  $\tilde{S}_T^D$  растет;

г) очевидным является преимущество систем  $\tilde{S}_T^D$  по показателю времени контроля и реконфигурации, а также  $D$ -диагностируемости. Выбор системы по показателю безотказности определяется знаком разности  $\Delta Q$ , вычисляемой с учетом (4) и (12) и формулы

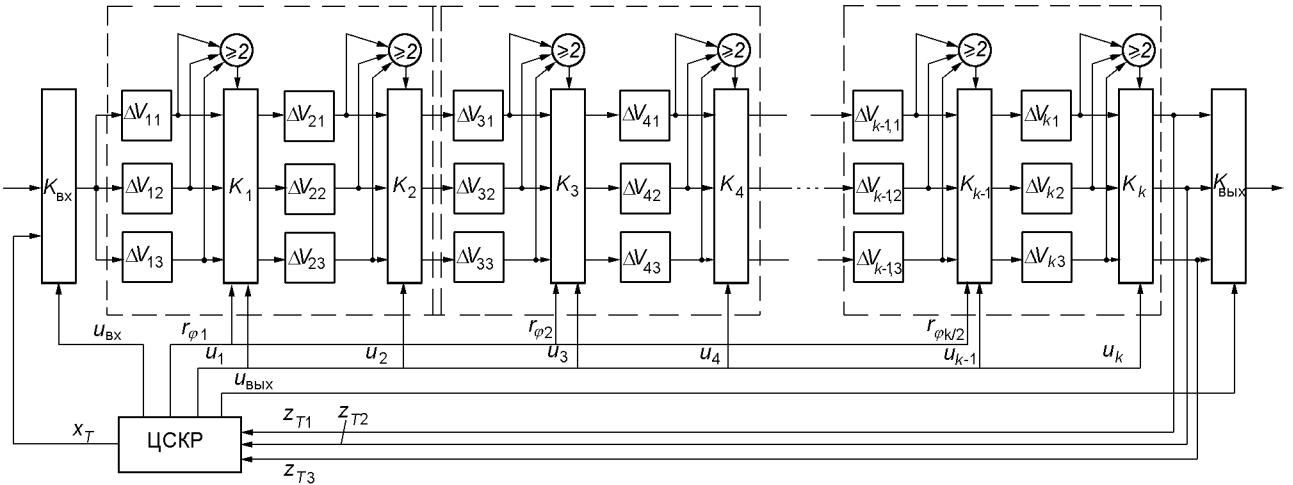


Рис. 3. Архитектура системы с ярусно-пороговой адаптацией

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q(\tilde{S}_T^{\text{II}}) - Q(\tilde{S}_T^{\text{I}}) = \\ &= (Q_A - Q_{\bar{A}})(P_{\xi_{\text{II}}} - P_{\xi_{\bar{A}}}) - Q_{\xi_{\text{ДЦ}}} \quad (13)\end{aligned}$$

где  $Q_A$ ,  $Q_{\bar{A}}$  — вероятности отказа адаптивной и неадаптивной структур систем  $\tilde{S}_T$  соответственно:

$$P_{\xi_{\text{II}}} = 1 - Q_{\xi_{\text{II}}}, \quad P_{\xi_{\bar{A}}} = 1 - kQ_{\xi_{\bar{A}}}.$$

Поскольку разность  $Q_A - Q_{\bar{A}}$  всегда меньше нуля, то знак  $\Delta Q$  без учета  $Q_{\xi_{\text{ДЦ}}}$  зависит только от знака разности  $P_{\xi_{\text{II}}} - P_{\xi_{\bar{A}}}$ .

#### 4. ЯРУСНО-ПОРОГОВАЯ АДАПТАЦИЯ МАЖОРИТАРНЫХ УВС

Результаты ДФ-декомпозиции позволяют получить максимальные значения показателей безотказности систем, выбрать оптимальное число ярусов, которое может быть весьма велико (сотни ярусов). В системах  $S_T^{\text{II}}$  это приводит к резкому увеличению длительности процесса поиска работоспособной конфигурации, что неприемлемо для УВС реального времени. Исследуем способ снижения влияния данного фактора на безотказность одноверсийных систем на основе использования систем с ярусно-пороговой адаптацией  $\tilde{S}_T^{\text{2A}}$  (см. п. 2). Поскольку время восстановления (реконфигурации) является возрастающей функцией  $k$  во всем диапазоне изменения числа ярусов, то предлагается варьировать значением  $k$  в зависимости от режима функционирования системы ( $r_{\varphi}$ ):

$$k = \begin{cases} k_{\text{opt}}, & \text{при } r_{\varphi} = 0, \\ k_{\text{opt}}/x, & \text{при } r_{\varphi} = 1, \end{cases} \quad (14)$$

где  $1 \leq x \leq k_{\text{opt}}$ . Величина  $x$  выбирается согласно неравенству

$$T_{\text{pk}}(x, k_{\text{opt}}) \leq T_{\text{pk}}^{\text{доп}}.$$

На рис. 3 показан пример архитектуры системы с ярусно-пороговой адаптацией и централизованными средствами управления контролем и реконфигурацией (ЦСКР). В этой системе в режиме поиска работоспособной конфигурации путем подачи тестовых сигналов  $x$  и анализа выходных реакций  $z_{Tj}$ ,  $j = 1, 2, 3$ , число ярусов может быть уменьшено в  $x$  раз ( $x = 2$ ) за счет перевода средств коммутации  $K_{\rho}$  ( $\rho = 2\varepsilon - 1$ ,  $\varepsilon = 1, \dots, k/2$ ) в состояние транзита сигналами  $r_{\varphi\rho} = 1$ . Конфигурация ярусов, состоящих из фрагментов  $\Delta V_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  задается управляющими сигналами  $u_i$ . Ярусы могут иметь три конфигурации: мажоритарную (до появления второго отказа), одноканальную (после отказов двух каналов яруса и завершения диагностирования) и транзитную (в процессе диагностирования).

Обратимся к первому слагаемому  $Q_A$  формулы (4), в котором коэффициент  $3k$  в вычитаемом в скобках указывает на максимально возможное число одноканальных конфигураций. Перейдем к выражению для вероятности правильного функционирования:

$$\begin{aligned}P(\tilde{S}_T^{\text{II}}) &= P_{\Pi} P_{\xi_{\text{II}}} \prod_{i=1}^k [3P_{\text{ффи}}^2 - 2P_{\text{ффи}}^3 + \\ &+ 3P(1 - P_{\text{ффи}})^2 P_{\xi_{\text{ii}}} P_{\text{кci}} P_{\text{рki}}], \quad (15)\end{aligned}$$

где  $P_{\xi_{\text{ii}}}$  — вероятность безотказной работы средств управления реконфигурацией  $i$ -го яруса;  $P_{\text{кci}}$  — вероятность правильной классификации состояния

*i*-го яруса;  $P_{\text{pri}}$  — вероятность того, что реконфигурация *i*-го яруса будет выполнена за время, не превышающее  $T_{\text{pk}}^{\text{доп}}$ . Эта вероятность может вычисляться следующим образом:

$$P_{\text{pri}} = \begin{cases} 1, & \text{если } T_{\text{pk}} \leq T_{\text{pk}}, \\ 0, & \text{если } T_{\text{pk}} > T_{\text{pk}}^{\text{доп}}, \end{cases} \quad (16)$$

Вероятности  $P_{\xi_{\text{я}}}$ ,  $P_{\text{кci}}$  от *k* зависят слабо, в то время как значение  $P_{\text{pri}}$  зависит от числа ярусов, определяющего количество возможных конфигураций. Тогда при справедливости допущения о равнодежности ярусов выражение (15) может быть преобразовано к виду:

$$\begin{aligned} P(\tilde{S}_{\text{T}}^{\text{II}}) = P_{\Pi} P_{\xi_{\Sigma_{\text{II}}}} \sum_{j=1}^k & \left[ (3P_{\phi\phi}^2 - 2P_{\phi\phi}^3)^{k-j} \times \right. \\ & \times [P_{\phi\phi}(1 - P_{\phi\phi})^2]^j \sum_{v=1}^{M(j,k)} P_{\text{pkv}} \}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $P_{\xi_{\Sigma_{\text{II}}}} = P_{\xi_{\text{II}}} P_{\xi_{\text{я}}}$ ,  $M(i, k)$  — число одноканальных конфигураций *k*-ярусной системы с *j* ярусами, содержащими два отказавших фрагмента. Формула (17) дает нижнюю оценку при  $P_{\xi_{\text{я}}} = P_{\xi_{\text{я}}}$ ,  $P_{\text{кci}} = P_{\text{кc}} = 1$ .

При отсутствии ограничений на время восстановления  $T_{\text{pk}}$  справедливо

$$\sum_{v=1}^{M(j,k)} P_{\text{pkv}} = C_k^j 3^j. \quad (18)$$

При наличии ограничений на время  $T_{\text{pk}}^{\text{доп}}$  будет проверено  $M_{\text{доп}} = \lceil T_{\text{pk}}^{\text{доп}} / \tau \rceil$  конфигураций ( $\tau$  — время проверки одной конфигурации,  $\lceil a \rceil$  — ближайшее целое число, не меньшее, чем  $a$ ), и выражение (18) преобразуется следующим образом:

$$\sum_{v=1}^{M(i,j)} P_{\text{pkv}} = \begin{cases} C_k^j 3^j, & \text{если } \frac{T_{\text{pk}}^{\max}(j, k)}{\tau} \leq M_{\text{доп}}, \\ C_k^j 3^j, & \text{если } \frac{T_{\text{pk}}^{\max}(j, k)}{\tau} > M_{\text{доп}}, \\ & \text{и } C_k^v 3^v \leq M_{\text{доп}}, \\ C_k^j 3^j - (C_k^v 3^v - M_{\text{доп}}), & \text{если } \frac{T_{\text{pk}}^{\max}(j, k)}{\tau} > M_{\text{доп}}, \\ & \text{и } \sum_{v=1}^j C_k^v 3^v > M_{\text{доп}}, \\ 0, & \text{если } C_k^j 3^j - (C_k^v 3^v - M_{\text{доп}}) \leq 0 \text{ и } j \geq 1, \\ 1, & \text{если } C_k^j 3^j - (C_k^v 3^v - M_{\text{доп}}) \leq 0 \text{ и } j = 0, \end{cases} \quad (19)$$

где  $T_{\text{pk}}^{\max}(j, k)$  — максимально возможное число конфигураций, которое необходимо проверить при отказе двух фрагментов в *j* ярусах. Следует подчеркнуть, что формулы (17)–(19) учитывают не толь-

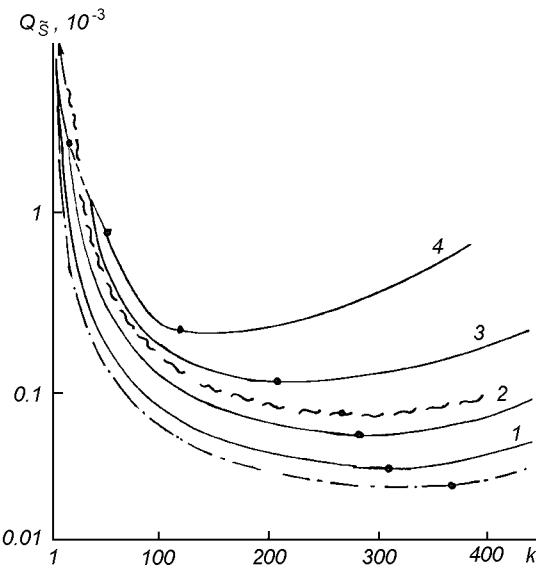


Рис. 4. Зависимости вероятности отказа систем с одно- и двупараметрической адаптацией от числа ярусов при различных ограничениях на время реконфигурации при  $\lambda_{\phi\phi}t = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_{\Pi} = 1$ ,  $n_{\phi} = 1500$ ,  $a_{\Pi} = 50$ ,  $b_{\Pi} = 0.01$ . Кривая 1 — для  $S_T^{1A}$ , сплошные кривые — для  $Q(S_T^{1A})$  ( $n_{\xi_0} = 2$ ), штрих-пунктирная —  $Q(S_T^{1A})$  ( $n_{\xi_0} = 1.5$ ),  $\Delta M = 0$ , волнистая —  $Q(S_T^{2A})$  ( $n_{\xi_0} = 2$ ),  $\Delta M = 0$ . Кривые 1—4 — для  $\Delta M = 0, 50, 100, 150$  соответственно

ко уровень безотказности всех элементов системы, но и динамические характеристики средств диагностирования и реконфигурации путем уменьшения числа слагаемых, определяющих прибавку в безотказности за счет перехода в одноканальную конфигурацию.

Результаты исследования функции  $Q(\tilde{S}_{\text{T}}^{\text{II}}) = 1 - P(\tilde{S}_{\text{T}}^{\text{II}})$ , проведенного в соответствии с формулами (17) и (19) с учетом выражений (4)–(8), иллюстрируются рис. 4. Их анализ позволяет установить, что:

а) уменьшение величины  $M_{\text{доп}}$  (увеличение  $\Delta M = C_k^v 3^v - M_{\text{доп}}$ ) ведет к снижению безотказности системы и уменьшению значения  $k_{\text{opt}}$ ;

б) введение механизма ярусно-пороговой адаптации позволяет уменьшить минимальное значение вероятности отказа системы практически при том же значении  $k_{\text{opt}}$ . Снижения ярусности системы в *x* раз эквивалентно пропорциональному уменьшению значения  $\Delta M$ ;

в) незначительное (до 30 %) увеличение сложности управляемых мажоритарных элементов для обеспечения режима транзита и укрупнения ярусов при поиске работоспособных конфигураций не при-

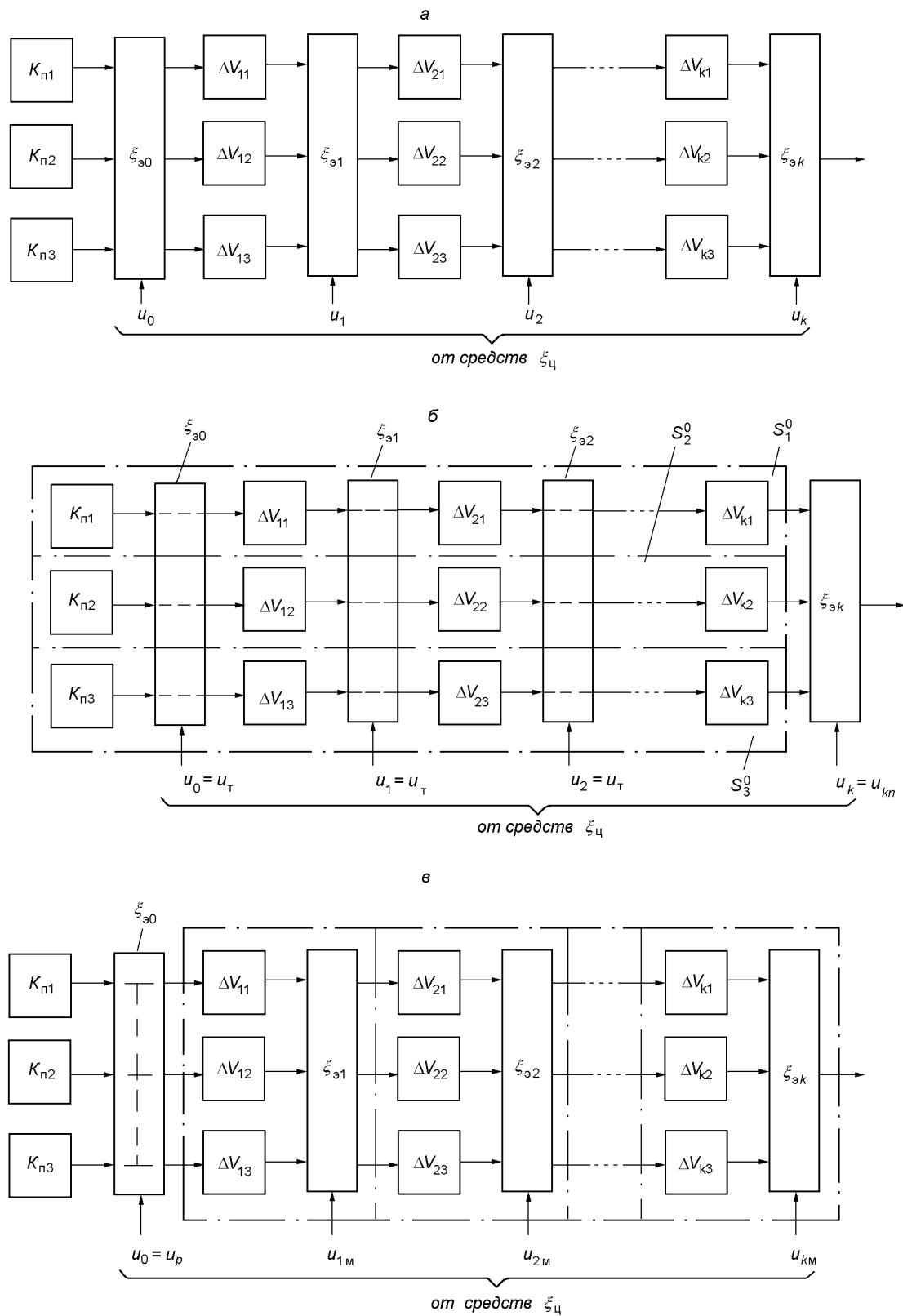


Рис. 5. Архитектура системы с ярусно-версионно-пороговой адаптацией: общая (а), для первого (б) и второго (в) режимов

водит к значительному увеличению вероятности отказа и уменьшению  $k_{\text{оп}}$ ;

г) каждому значению  $\Delta M$  соответствует величина  $k^*$ , при которой становится невозможным реализация пороговой адаптации по ярусам, что эквивалентно переходу систем в режим неадаптивного функционирования.

### 5. ЯРУСНО-ВЕРСИОННО-ПОРОГОВАЯ АДАПТАЦИЯ МАЖОРИТАРНЫХ УВС

Ярусно-пороговая адаптация не позволяет реализовать свойство ДП-устойчивости, поскольку предполагает наличие многоярусной архитектуры, а следовательно, исключает возможность параллельного выполнения разных версий. Однако идея изменения ярусности может быть применена для повышения ДФ-устойчивости или увеличения ДП-устойчивости МВС. При разработке способа ярусно-версионной адаптации МВС учтено три обстоятельства: во-первых, такие системы при появлении физического дефекта аппаратного компонента любой версии теряют частично или полностью (при  $e = 3$ ) свойство ДП-устойчивости; во-вторых, в них исключается возможность раздельного резервирования аппаратных компонентов, осуществляющих обработку данных по единому алгоритму; в-третьих, область выигрыша в ДП-устойчивости МВС по отношению к одноверсионным системам ограничена во времени, и тем больше, чем надежнее их аппаратные компоненты [11]. Следовательно, необходим механизм адаптации, позволяющий на некотором начальном этапе применения УВС функционировать в многоверсионной конфигурации, а затем по мере накопления дефектов аппаратных компонентов переходить к работе по однотипным версиям. Суть метода ярусно-версионной (ярусно-версионно-пороговой) адаптации иллюстрируется архитектурой системы с ЦСКР (рис. 5). Ее общий вид показан на рис. 5, а, где  $K_{\text{пj}}$ ,  $j = 1, 2, 3$  — программные компоненты версий,  $\xi_{\text{оi}}$  — средства мажоритарирования и коммутации, управляемые централизованными средствами  $\xi_{\text{ц}}$  с помощью сигналов  $u_i$ .

В первом режиме система функционирует как МВС (рис. 5, б), которые реализуются подсистемами  $S_j^0 = \{\Delta V_{ij} (i = 1, \dots, k), K_{\text{пj}}\}$ . При этом средства выполнения функций  $\xi_{\text{оi}}$  переводятся в режим транзита ( $u_v = u_T, v = 0, \dots, k - 1$ ) образуя независимые подсистемы  $S_j^0$ , выходные сигналы которых мажоритируются средствами  $\xi_{\text{ок}}$  ( $u_k = u_m$ ).

При появлении первого физического дефекта

фрагментов  $\Delta V_{ij}$ , исключающего возможность парирования ДП, система переводится в многоярусную конфигурацию (рис. 5, в), в которой все каналы системы реализуют одну версию, задаваемую, например, компонентом  $K_{\text{п1}}$  с помощью сигнала  $u_p$ . Конфигурация ярусов формируется затем с учетом состояния фрагментов  $\Delta V_{ij}$  сигналами  $u_{im}$  аналогично тому, как это описано выше для систем с ярусно-пороговой адаптацией.

Рассмотренным конфигурациям при условии справедливости экспоненциальных законов возникновения ДФ и проявления ДП соответствуют структурные схемы надежности, показанные на рис. 6. В первой конфигурации фильтруются последствия относительных ДП, проявляющихся с интенсивностью  $\lambda_{\text{поj}}$ , во второй — последствия ДФ раздельно мажоритуемых аппаратных компонентов (интенсивность их возникновения по фрагментам равна  $\lambda_{\text{фphi}}$ ). Во второй конфигурации в одном из ярусов имеется отказавший фрагмент. Вероятность правильного функционирования системы  $S_T^{3A}$  с ярусно-версионно-пороговой адаптацией равна

$$P(\tilde{S}_T^{3A}) = (P_I P_{\tilde{S}I} + P_{II} P_{\tilde{S}II}) P_{\xi_{\text{ц}}}, \quad (20)$$

где  $P_I$  ( $P_{II}$ ) — вероятность нахождения системы в первой (второй) конфигурации;  $P_{\tilde{S}I}$  ( $P_{\tilde{S}II}$ ) — вероятность правильного функционирования системы в первой (второй) конфигурации.

Формула (20) дает нижнюю оценку с учетом того, что она получена при условии, что любой отказ ЦСКР ведет к отказу системы.

Для случая равнодежных и идеальных фрагментов ярусов имеем

$$P_I = P_{\text{фphi}}^{3k}, \quad (21)$$

$$P_{\tilde{S}I} = (3P_{\text{по}}^2 - 2P_{\text{по}}^3)P_{\text{на}} P_{\xi_{\text{ок}}}, \quad (22)$$

$$P_{II} = 3k(1 - P_{\text{фphi}})P_{\text{фphi}}^{3k-1}, \quad (23)$$

$$P_{\tilde{S}II} = [P_{\text{фphi}}^2 + 2P_{\text{фphi}}(1 - P_{\text{фphi}})D_{\text{кф}}] [3P_{\text{фphi}}^2 - 2P_{\text{фphi}}^3 + 3P_{\text{фphi}}(1 - P_{\text{фphi}})^2 D_{\text{кф}}]^{k-1} P_{\text{по}} P_{\text{на}}, \quad (24)$$

где  $P_{\text{по}} \approx 1 - \alpha\beta\lambda_{\text{ф}}t$ ,  $P_{\text{на}} \approx 1 - \alpha(1 - \beta)\lambda_{\text{ф}}t$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты ДП и абсолютных ДП соответственно [8].

С учетом (20)–(24) получим

$$\begin{aligned} P(\tilde{S}_T^{3A}) &= P_{\text{фphi}}^{3k} P_{\xi_{\text{ц}}} P_{\text{на}} [(3P_{\text{по}}^2 - 2P_{\text{по}}^3)P_{\xi_{\text{ок}}} + \\ &+ 3k(1 - P_{\text{фphi}})[P_{\text{фphi}} + 2(1 - P_{\text{фphi}})D_{\text{кф}}][3P_{\text{фphi}}^2 - 2P_{\text{фphi}}^3 + \\ &+ 3P_{\text{фphi}}(1 - P_{\text{фphi}})^2 D_{\text{кф}}]^{k-1} P_{\text{по}}]. \end{aligned} \quad (25)$$

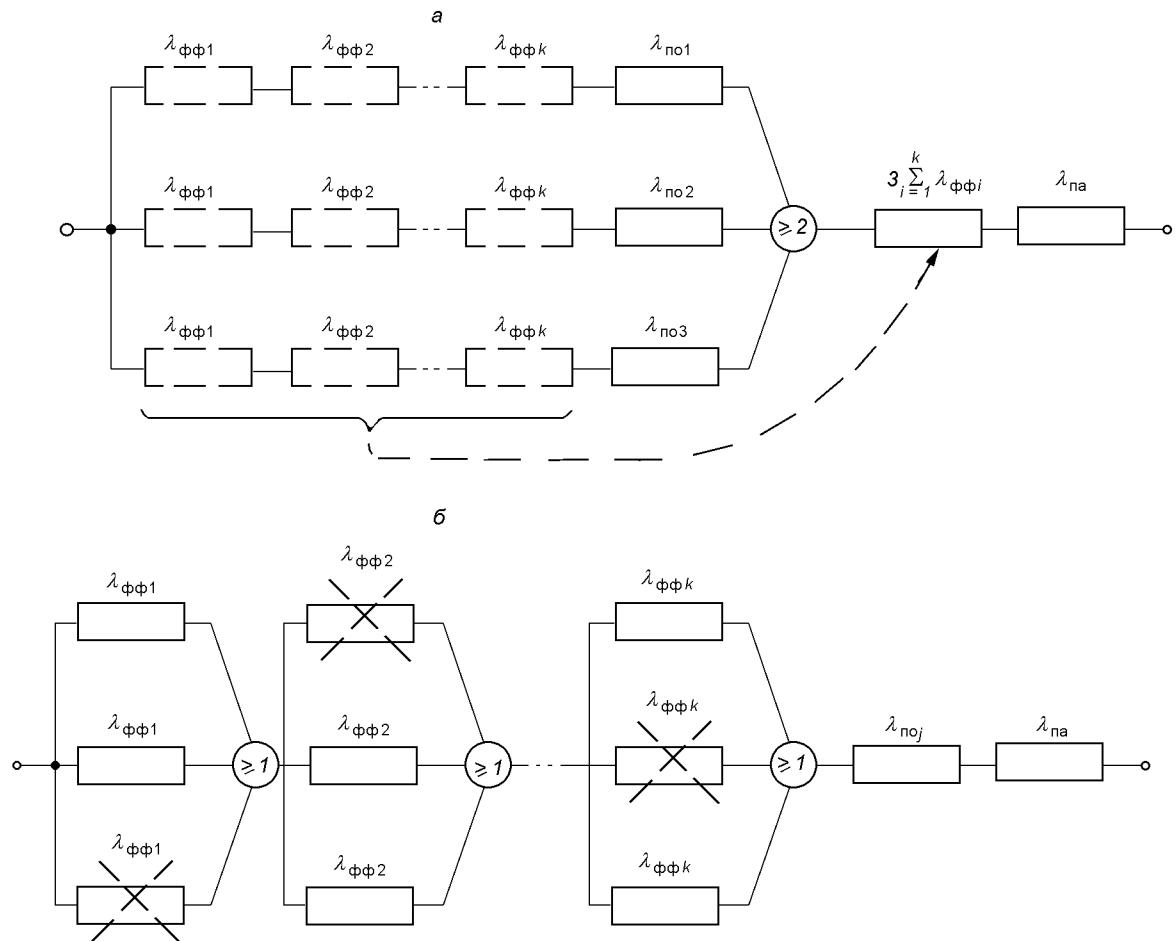


Рис. 6. Структурные схемы надежности системы с ярусно-версионно-пороговой адаптацией для первого (а) и второго (б) режимов

Исследуем зависимость вероятности  $P(\tilde{S}_T^{3A})$  от основных аргументов, учитывая формулы (6)–(8). Исследование функции (25) показывает, что:

а) характер изменения значения  $k_{opt}$  в системах с ярусно-версионной адаптацией в зависимости от сложности альтернативных версий  $n_\phi$  и мажоритарных ярусов  $n_{\xi^0}$  аналогичен системам с однопараметрической пороговой адаптацией. С увеличением  $n_\phi$  и уменьшением  $n_{\xi^0}$  величина  $k_{opt}$  в системах  $\tilde{S}_T^{3A}$  увеличивается;

б) увеличение коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  снижает Д-устойчивость систем  $\tilde{S}_T^{3A}$ , оптимальное число ярусов при переходе во вторую конфигурацию при этом не изменяется;

в) в отличие от систем с однопараметрической адаптацией изменение (уменьшение) параметра  $\lambda_{\phi i}$  в системах  $\tilde{S}_T^{3A}$  влияет на величину  $k_{opt}$  (вызывает его увеличение);

г) использование систем с ярусно-версионно-пороговой адаптацией обеспечивает существенное (при определенных условиях в 3–5 раз) увеличение Д-устойчивости (устойчивости к дефектам как аппаратных, так и программных средств), проигрывая им незначительно в ДФ-устойчивости (безотказности).

На рис. 7 показан график зависимости вероятности отказа  $Q(\tilde{S}_T^{3A})$  системы, реализующей два режима аналогоично системе  $S_T^{3A}$  с той разницей, что в первом режиме, как и во втором, выполняются одинаковые версии. Проигрыш в ДФ-устойчивости показан штриховкой;

д) системы с ярусно-версионно-пороговой адаптацией целесообразно использовать в бортовых УВС с длительным периодом функционирования, разделяемым на два этапа — с реализацией более сложных алгоритмов на первом (относительно непродолжительном) этапе, когда выполняются раз-

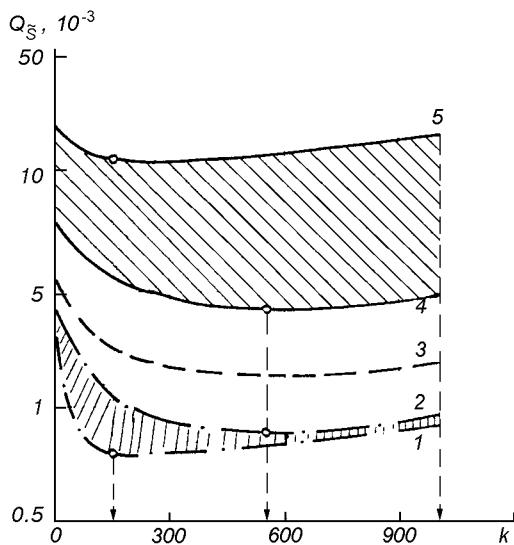


Рис. 7. Зависимости вероятности отказа систем с одно- и многопараметрической адаптацией от числа ярусов при  $\lambda_{\phi}st = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $n_{\phi} = 1000$ ,  $n_{\xi_0} = 3$ ,  $D_{\phi\psi} = 0.8$ ,  $a_{\psi} = 50$ ,  $b_{\psi} = 0.01$ . Кривые 1 и 5 — для  $S_T^{1A}$ , 2 — для  $S_T^{2A}$ , 3 и 4 — для  $S_T^{3A}$ ; кривые 1 и 2 — для  $\alpha = \beta = 0$ ; 3 — для  $\alpha = 0.1, \beta = 0.01$ ; 4 и 5 — для  $\alpha = 0.3, \beta = 0.1$

личные версии и обеспечивается парирование ДП, и переходом к многоярусной одноверсионной архитектуре на более продолжительном втором этапе, на котором нейтрализуются последствия ДФ фрагментов путем пороговой адаптации. При наличии жестких ограничений на время восстановления во втором режиме следует использовать метод ярусно-пороговой адаптации. Возможны и другие стратегии выбора способа адаптации в зависимости от режима, продолжительности функционирования и задач бортовых УВС.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При решении задачи ДФ-декомпозиции МВС, являющейся составной частью общей задачи оптимального резервирования, должны учитываться не только характеристики безотказности аппаратных компонентов версий, но и характеристики средств контроля и реконфигурации, поскольку от их значений существенно зависит оптимальное число ярусов (фрагментов) и минимальные значения вероятности отказа. Переход к МВС с децентрализованными (или групповыми) средствами следует производить при превалировании ограничения на

время реконфигурации.

2. Отличительной особенностью предложенных методов многопараметрической адаптации является управляемое варьирование значениями нескольких параметров, влияющих на Д-устойчивость и другие свойства МВС в зависимости от режима функционирования, числа и номенклатуры дефектов. Это дает возможность реализации различных версий на начальном этапе с последующим переходом к многоярусной тривиальной архитектуре, обеспечивающей максимальную ДФ-устойчивость и минимизирующую временные затраты на поиск работоспособной конфигурации. Количественные оценки Д-устойчивости (ДФ-устойчивости) систем с ярусно-пороговой и ярусно-версионной адаптацией позволяют определить достигаемый эффект при различных значениях параметров аппаратных и программных компонентов и уточнить области целесообразного применения. Для приведенных в статье исходных данных вероятность отказа при использовании предложенных методов уменьшается на 40—50 %.

3. Системы с многопараметрической адаптацией по аналогии с контролерпригодными системами могут быть названы реконфигуропригодными. Степень реконфигуропригодности определяется мощностью множеств формируемых конфигураций и качеством соответствующих алгоритмических и технических средств.

4. Техническая реализация средств контроля и реконфигурации для рассмотренных адаптивных мажоритарных систем (рис. 3) может быть осуществлена на основе устройств, описанных в авторских свидетельствах [1, 2]. Это позволяет в 1.3—1.8 раз уменьшить среднее время и в 2—5 раз — максимальное время реконфигурации.

5. Учитывая особенности современной элементной базы, используемой при проектировании бортовых УВС, (ПЛИС, микропроцессорные БИС и СБИС, матричные многопроцессорные СБИС и другие), ярусы резервирования могут полностью или частично реализовываться на внутрикристаллическом уровне, причем число ярусов и кратность резервирования уменьшается. Вследствие этого:

а) более целесообразным является использование версионно-пороговой и версионной адаптации;

б) при выборе и реализации вариантов многопараметрической адаптации необходимо учитывать зависимость между отказами элементов, относящихся к одному или нескольким ярусам;

в) возможна многопараметрическая адаптация, для которой функция адаптации связывает число задач, реализуемых, например, в систолической матричной СБИС, с числом отказавших элементов (процессоров).

1. А. с. 1633233 СССР, МКИ G06F9/22, 11/18. Устройство для управления диагностированием и восстановлением цифровых систем / В. И. Свищ, Н. Ф. Сидоренко, В. С. Харченко и др. — Опубл. 28.01.91, Бюл. № 4.
2. А. с. 1741295 СССР, МКИ G06F9/22. Система для программного управления резервированными объектами / Н. К. Байда, В. С. Харченко, Г. Н. Тимоныкин и др. — Опубл. 14.06.92, Бюл. № 22.
3. Доманицкий С. М. Построение надежных логических устройств. — М.: Энергия, 1971.—279 с.
4. Колесников В. Н. Оптимальный синтез многоканальных структур ЦВМ. — М.: Сов. радио, 1976.—176 с.
5. Кривоносов А. И., Байда Н. К., Харченко В. С. и др. Структура, организация и модели мажоритарно-резервированных систем // Космическая наука и технология.—1996.—№ 1.—С. 71—76.
6. Харченко В. С. Модели и свойства отказоустойчивых многоальтернативных систем // Автоматика и телемеханика.—1992.—№ 12.—С. 140—147.
7. Харченко В. С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. — Харьков: Изд-во ХВУ, 1995.—506 с.
8. Харченко В. С. Выбор технологии проектирования и базовых архитектур дефектоустойчивых цифровых управляющих и вычислительных систем реального времени // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 109—119.
9. Харченко В. С., Кукуруза В. Л. Многоальтернативные отказоустойчивые системы со встроенным микрореконфигураторами // Методы и системы диагностики. — Саратов: Сар. гос. ун-т, 1990.—С. 41—43.
10. Харченко В. С., Литвиненко В. Г. Модели парирования дефектов проектирования программно-аппаратных средств в необслуживаемых системах // Электронное моделирование.—1992.—№ 3.—С. 34—39.
11. Харченко В. С., Литвиненко В. Г., Терещенков С. В. Обеспечение устойчивости управляющих и вычислительных систем к физическим дефектам и дефектам проектирования программно-аппаратных средств // Зарубежная электроника.—1992.—№ 6.—С. 18—35.
12. Харченко В. С., Никольский С. Б., Сазонов А. Е. Один подход к синтезу микроконтроллерных сетей // Автоматика и вычислительная техника.—1989.—№ 4.—С. 87—95.
13. Laprie J.-C. Dependability Handbook // Laboratory for Dependability Engineering. LAAS Report.—1998.—N 98-346.—365 p.

---

**METHODS OF THE MULTIPARAMETRIC ADAPTATION  
OF SPACEBORNE CONTROL AND COMPUTING SYSTEMS  
WITH SEPARATE MAJORITY RESERVATION**

V. S. Kharchenko, A. P. Zenin, and V. V. Sklyar

We generalize the architectures of spaceborne digital fault-tolerant systems (FTS) with separate majority reservation (SRM) and three adaptive parameters (the threshold of recovering unit, number of reservation levels and number of software versions). The results of the studies of the SRM FTS with the level-threshold and level-version-threshold adaptation are presented.

УДК 531.768

# Фізико-математичне вимірювальних перетворювачів тиску з пневомеханічним резонатором

М. Г. Черняк, О. М. Бондаренко, Т. В. Коваленко

Науково-аналітичний центр критичних технологій навігаційного приладобудування  
при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут», Київ

Надійшла до редакції 03.08.99

Побудована фізико-математична модель ефекту чутливості пневомеханічної автоколивальної системи до тиску газу, розглянуті базові функціональні схеми побудови вимірювальних перетворювачів тиску та різниці тиску на основі такої системи і отримані аналітичні вирази для залежності їхньої частоти коливань від вимірюваного тиску та чутливості до тиску, вироблені рекомендації щодо проектування та вдосконалення таких пристрій.

Створення сучасних систем вимірювання висотно-швидкісних параметрів літальних апаратів, автоматичного регулювання та діагностики їхніх двигунів пов'язане з розробкою прецизійних вимірювальних перетворювачів тиску (ВПТ), що забезпечують високі метрологічні та експлуатаційні характеристики. ВПТ з пневомеханічним резонатором (ПМР) є одним із найперспективніших типів таких вимірювальних перетворювачів [9].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Базовим функціональним перетворювачем ВПТ з ПМР є пневомеханічна автоколивальна система (рис. 1, а), вихідна частота якої залежить від вимірюваного тиску. Вона складається із пневомеханічного резонатора ПМР, системи збурення СЗ та системи реєстрації СР коливань ПМР і широкополосного підсилювача П, що компенсує втрати енергії за період коливань ПМР. ПМР включає плоску пневмокамеру, заповнену газом, та плоский резонуючий елемент (рис. 1, б), який здійснює коливання з власною резонансною частотою ПМР поблизу нерухомого газонепроникного екрану 4. Будову резонуючого елемента умовно представлено

у вигляді жорсткої ефективної частини 1 з робочою поверхнею площею  $S_{\text{еф}}$ , утримуваної на пружних елементах 2, а пневмокамера утворена щілинним зазором 3. Позначені також підсилювач 5, електроди ємнісних систем реєстрації 6 та систем збурення 7. Нумерація елементів 1—5 надалі залишається незмінною на усіх рисунках.

Умовою роботоздатності ПМР є таке мале значення зазору  $\delta$ , що газ внаслідок своєї в'язкості не встигає витікати із зазору (або натікати в нього) за півперіод коливань резонуючого елемента у вакуумі.

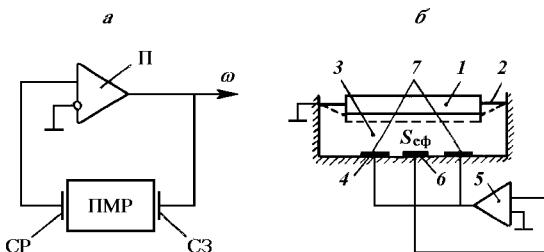


Рис. 1. Пневомеханічна автоколивальна система (а) та пневомеханічний резонатор (б): 1 — жорстка ефективна частина, 2 — пружні елементи, 3 — щілинний зазор, 4 — нерухомий газонепроникний екран, 5 — підсилювач, 6 — електроди ємнісної системи реєстрації (СР), 7 — електроди системи збурення (СЗ)

мі. В цьому випадку стиснення (розширення) газу дає внесок у еквівалентну жорсткість ПМР  $c_{\text{пс}}$ . Вона залежить від тиску подаваного до зазору газу та конструктивних параметрів пневмокамери і нижче називатиметься жорсткістю пружного середовища, або приєдданою жорсткістю резонуючого елемента. Крім того, за прискореного руху резонуючого елемента в газовому середовищі до його поверхні буде «прилипати» частина газу, що даватиме внесок у еквівалентну масу ПМР — приєддану масу  $m_{\text{пп}}$ , що залежить від геометрії пневмокамери та резонуючого елемента і густини газу. Ці два параметри відповідно будуть впливати на власну частоту  $\omega$  коливань ПМР.

З метою підвищення чутливості ВПТ до вимірюваного тиску і послаблення впливу невимірюваних величин (температури, густини газу, інерційності газу та резонуючого елемента, гіроскопічних ефектів і т. н.) доречно використати дві автоколивальні системи, що отримують дію від вимірюваної величини протилежного, а від невимірюваних величин — одинакового характеру, об'єднані за відомою у приладобудуванні диференціальною схемою.

Нижче будуть отримані та дослідженні аналітичні функції перетворення ПМР з резонуючим елементом із зосередженими та розподіленими параметрами, показані можливості створення ВПТ з такими ПМР та вироблені рекомендації щодо їхнього проектування.

#### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІЗИЧНОГО ЕФЕКТУ ЧУТЛИВОСТІ ЧАСТОТИ ГЕНЕРАЦІЇ ПНЕВМОМЕХАНІЧНОЇ АВТОКОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДО ВИМІРЮВАНОГО ТИСКУ ГАЗУ

**Вихідні положення та умова роботоздатності ПМР.** Для отримання функції перетворення описаного ПМР вводимо наступні спрощуючі твердження.

1. Величини зазорів ПМР  $\delta$  набагато менші довжини звукової хвилі в середовищі, що заповнює зазор, тому в практичних розрахунках можна користуватись середніми значеннями густини  $\rho$  і тиску  $P$  вздовж товщини зазору [7];

2. Швидкість зміни об'єму пневмокамери, а значить, густини та температури пружного середовища, набагато більша від швидкості протікання теплових процесів, тому запас тепла в пневмокамері за період коливань резонуючого елемента залишається практично постійним. Це є умовою адіабатності термодинамічного процесу в пневмокамері [7];

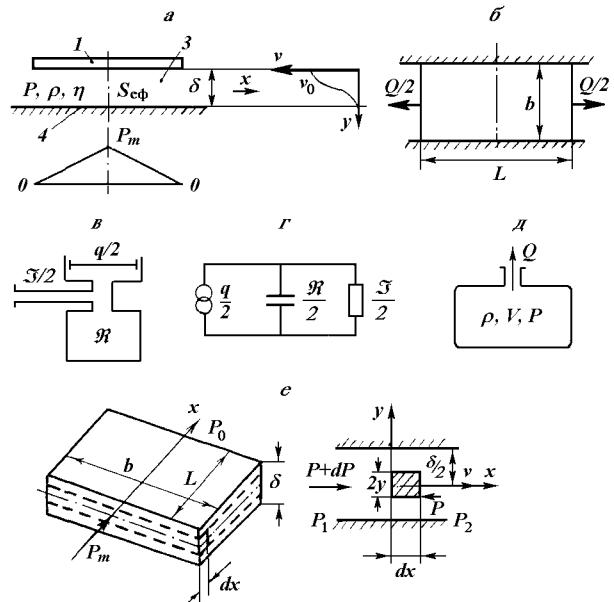


Рис. 2. Допоміжні схеми (див. текст)

3. Амплітуда коливань резонуючого елемента мала в порівнянні з його товщиною  $h$  та величиною щілинного зазору ПМР, внаслідок чого малі і відхилення тиску  $P = P - P_0$  від його постійної складової  $P_0$ . Ця постійна складова задається зовнішнім до пневмокамери об'ємом, досить великим у порівнянні з обсягом пневмокамери.

Розглянемо пневмокамеру у вигляді щілинного зазору  $3$  між плоскою ефективною частиною  $1$  резонуючого елемента і близьким до неї газонепроникним екраном  $4$  (рис. 2,  $a$ ). Для визначеності задамо прямокутну форму ефективної частини  $1$  (довжина  $L$  та ширина  $b$ ), а також країві умови: вздовж довжини пластинки зазор ізольований, тому витікання газу можливе лише у двох рівноцінних напрямках — через два вільні контури вздовж ширини пластинки (рис. 2,  $b$ ). Вважаємо, що максимальний тиск  $P_m$  у зазорі після різкого стиснення газу ефективною частиною  $1$ , що рухається, увесь час витікання газу буде в центральному поперечному перетині пневмокамери (ЦПП), а вздовж її ширини тиск практично не змінюється. Тому процес витікання вважатимемо одномірним — вздовж координати  $x$ , що відкладається від центра зазору до одного з вільних контурів витікання газу. Через ЦПП газ не буде перетікати, тому, не порушуючи фізики процесу, можна умовно провести непроникну стінку крізь ЦПП та розглянути лише одну з рівноцінних «половинок» пневмокамери обабіч перетину.

На основі твердження 3 задамося лінійною зміною малого надлишкового тиску  $\bar{P}$  за координатою  $x$  від  $P_m = P_m - P_0$  в центрі до  $P_0 = 0$  на вільному контурі

$$\bar{P} = \bar{P}_m \left(1 - \frac{2x}{L}\right). \quad (1)$$

Такий фрагмент пневмокамери легко замінити приведеною на рис. 2, в еквівалентною пневмосистемою (ЕПС) із зосередженими параметрами. Вона складається із половинок пневматичного опору пневмокамери  $\mathfrak{S}/2$ , постійної ємності пневмокамери  $\mathfrak{R}/2$  та змінного джерела об'ємної швидкості  $q/2$ , яка зв'язана з прогином  $w_m$  резонуючого елемента через оператор диференціювання:  $q = d/dt(S_{\text{еф}}w_m)$ . Ці елементи з'єднані між собою короткими каналами, що не чинять опору потоку газу. Також на основі твердження 3 вважаємо, що зміни площини поперечного перетину пневмокамери за півперіод коливань резонуючого елемента менші, ніж загальна площа перетину  $S_c = b\delta$ , і на загальні  $\mathfrak{R}$  та  $\mathfrak{S}$  практично не впливають. Стан такої ЕПС повністю описується значеннями тиску  $P$  на з'єднувальних елементах і об'ємною швидкістю  $Q = v_r S_c$  через ці елементи, де  $v_r$  — швидкість газу, що протікає через  $S_c$ .

Функціональну схему ЕПС (рис. 2, в) зручно представити у вигляді наведеної на рис. 2, г електричної схеми аналога [8], що є схемою аперіодичної ланки першого порядку (паралельно з'єднані ємність та опір) з постійною часу  $T_p$  [4]

$$T_p = \frac{\mathfrak{R}}{4}. \quad (2)$$

Вона ж є постійною часу ЕПС (рис. 2, в) та вихідної пневмокамери, зображеній на рис. 2, а.

Загальну пневматичну ємність  $\mathfrak{R}$  представимо у вигляді посудини з незмінним об'ємом  $V$ , що дорівнює об'єму пневмокамери (рис. 2, д). Із твердження 3 витікає, що рух середовища всередині посудини малий, і можна знехтувати втратами на тертя та інерцію газа в порівнянні з його податливістю (ємністю  $\mathfrak{R}$ ). Виходимо із закону (3) зміни маси газу  $M$  у посудині, рівняння Пуассона (4), що описує адіабатний процес [7], для початкового та віддаленого від нього на малий проміжок  $dt$  моментів часу і виразу (5) для тиску  $P'$  у посудині через його приріст  $dP$ :

$$\frac{dM}{dt} = \rho Q, \quad (3)$$

$$\frac{P'}{\rho^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_r^\gamma} = \text{const}, \quad (4)$$

де

$$P' = P_0 - dP, \quad (5)$$

Тут  $\gamma$  — коефіцієнт Пуассона для газу,  $\rho_r$  — густина газу в початковий момент часу. Виключаючи з цих рівнянь  $P'$  і  $\rho$  та зважаючи на те, що густина газу  $\rho$  за час  $dt$  мало змінюється, і користуючись наближенням

$$(1 - \rho Q dt / M)^\gamma \approx 1 - \gamma \rho Q dt / M,$$

отримуємо залежність  $Q = \mathfrak{R} dP / dt$ , де

$$\mathfrak{R} = \frac{V}{\gamma P_0} = \frac{V}{\rho_r c_{\text{3B}}^2} = \frac{L b \delta}{\rho_r c_{\text{3B}}^2} \quad (6)$$

— загальна пневматична ємність пневмокамери.

Загальний пневматичний опір пневмокамери розглянемо як опір прямокутної щілини, показаної на рис. 2, е. Виходячи з умови рівноваги усіх сил, що діють на елементарну ділянку газу довжиною  $dx$  та шириною  $b$ , в межах якої густина постійна,

$$-2Pby + 2(P + dP)by - 2bdxt = 0,$$

та закону в'язкого тертя Ньютона для дотичного напруження  $\tau = \eta dv_r / dy$ , де  $\eta$  — коефіцієнт динамічної в'язкості газу, маємо

$$y \frac{dP}{dx} = \eta \frac{dv_r}{dy}.$$

Якщо це рівняння за крайової умови  $v_r|_{y=\delta/2} = 0$  проінтегрувати за координатою  $y$  і знайти середню швидкість газу  $v_{\text{cp}}$ , то з урахуванням лінійної залежності (1) можемо записати вираз для об'ємної швидкості протікання газу через щілину

$$Q = v_{\text{cp}} S_c = P_m / \mathfrak{S},$$

де

$$\mathfrak{S} = \frac{12\eta L}{\delta^3 b} \quad (7)$$

— загальний пневматичний опір пневмокамери, що входить до виразу (2).

Задля виконання умови роботоздатності постійна часу пневмокамери повинна перевищувати півперіод коливань резонуючого елемента (час його переміщення із одного крайнього положення в інше), котрий обернено пропорційний власній частоті  $\omega_0$  вільних коливань резонуючого елемента у вакуумі:  $T_p > (\omega_0)^{-1}$ . Підставивши сюди вираз (2) з урахуванням (6) та (7) і зробивши нескладні перетворення, отримаємо аналітичний вираз для умови роботоздатності ПМР:

$$\delta < [\delta] = k^* L \sqrt{\frac{\nu \omega_0}{c_{\text{3B}}^2}}, \quad (8)$$

де  $k^* = (6)^{0.5} \approx 2.45$ ,  $[\delta]$  — допустимий зазор ПМР,  $\nu = \eta / \rho_r$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості газу.

Довільну форму ефективної частини плоского

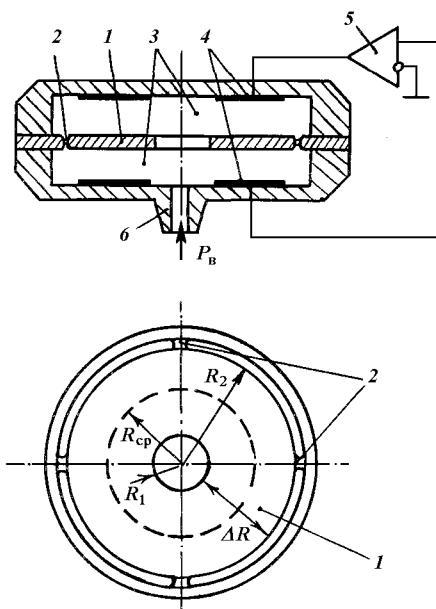


Рис. 3. Схема ВПТ з кільцевим резонатором (див. текст та позначення на рис. 1)

резонуючого елемента можна звести до еквівалентної прямокутної пластинки (ЕПП), що дорівнює за площею робочій поверхні ефективної частини  $S_{\text{еф}}$  і має два характерні розміри — найбільший та найменший усереднений. Якщо ці розміри неспівмірні, то до виразу (8) підставляється менший. При співмірних сторонах ЕПП потрібно враховувати додаткові відтоки газу з пневмокамери, які зменшать загальний опір, а значить, і постійну часу пневмокамери та величину допустимого зазору  $[\delta]$ .

**ВПТ з резонуючого елемента із зосередженими параметрами.** Найближчою до схеми ПМР рис. 1, б є базова функціональна схема ВПТ з кільцевим резонатором (рис. 3). Такий ВПТ [3] можна вважати системою із зосередженими параметрами. Вимірюваний тиск  $P_b$  тут відразу подається через штуцер 6 до пневмокамер 3. Кільцеву пластинку згідно із запропонованою вище методикою подаємо у вигляді ЕПП площею  $S_{\text{еф}} = \pi(R_2^2 - R_1^2)$ , при її довжині  $L = \Delta R = R_2 - R_1$  та ширині  $b = S_{\text{еф}}/\Delta R = \pi(R_2 + R_1)$ , а пневмокамеру під нею вважаємо також ізольованою (вздовж поперечного контуру в окружному напрямі по вихідному кільцевому зазору перепадів тиску не буде). Маємо умову роботоздатності ПМР (8), яка повністю збігається з отриманою експериментально авторами [3], з коефіцієнтом  $k^* = 2.45$ , значення которого попадає у заданий ними діапазон  $k^* = 1...3$ .

Для знаходження жорсткості пружного середовища  $c_{\text{nc}}$  візьмемо рівняння Пуассона у формі  $PV^\gamma = \text{const}$ , де  $V = S_{\text{еф}}(\delta \pm w_n)$ . Прирівнюючи ліві частини рівнянь Пуассона для нейтрального та довільного положення ефективної частини 1 отримуємо вираз для тиску у пневмокамері:  $P = P_b(V_0/V)^\gamma$ . Тут  $P_b$  та  $V_0 = S_{\text{еф}}\delta$  — тиск у пневмокамері та її об'єм за нейтрального положення ефективної частини. Нехай для визначеності у пневмокамері 4 відбулося стиснення. Беручи до уваги, що витіснений ефективною частиною об'єм  $\Delta V = V_0 - V \ll V_0$ , то надлишковий тиск у пневмокамері, викликаний зменшенням об'єму, визначатиметься виразом

$$\Delta P = P - P_b = P_b \left[ \left( \frac{V_0}{V_0 - \Delta V} \right)^\gamma - 1 \right] \approx \gamma P_b \frac{\Delta V}{V_0}.$$

Сила, що діє з боку стиснутого пружного середовища на ефективну частину, дорівнює

$$F_{\text{nc}} = \Delta P S_{\text{еф}} = c_{\text{nc}} w_m,$$

де

$$c_{\text{nc}} = \frac{F_{\text{nc}}}{w_m} = \frac{\gamma}{\delta} P_b \frac{\Delta V}{w_m}, \quad (9)$$

— шукана жорсткість пружного середовища. За адіабатного розширення газу зміниться лише знак сили  $F_{\text{nc}}$ . У випадку розглядуваного тут резонуючого елемента з ефективною частиною незмінної форми (жорстке кільце)

$$c_{\text{nc}} = \frac{\gamma}{\delta} P_b S_{\text{еф}}. \quad (10)$$

Для отримання аналітичного виразу для частоти коливань ПМР з довільним типом резонуючого елемента універсальною та найшвидшою є формальна методика, заснована на балансі максимальної кінетичної енергії коливань ПМР та максимального приросту його потенціальної енергії:

$$T_{\text{max}} = \Delta U_{\text{max}}, \quad (11)$$

котрі в свою чергу складаються з енергії складових частин ПМР (резонуючого елемента та пружного середовища):

$$\begin{aligned} T_{\text{max}} &= T_{\text{pe}} + T_{\text{nc}}, \\ \Delta U_{\text{max}} &= \Delta U_{\text{pe}} + \Delta U_{\text{nc}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для резонуючого елемента із зосередженими параметрами вирази для цих складових мають відомий з механіки [7, 10] вигляд:

$$T_{\text{pe}} = \frac{m_{\text{pe}} v_0^2}{2}, \quad T_{\text{nc}} = 2\rho_r \int_v \frac{v_c^2}{2} dV, \quad (13)$$

$$\Delta U_{pe} = c_{pe} \frac{w_m^2}{2}, \quad \Delta U_{nc} = 2c_{nc} \frac{w_m^2}{2}, \quad (14)$$

де  $m_{pe} = \rho_0 S_{pe} h$  — маса резонуючого елемента, котра задіяна у коливаннях;  $\rho_0$  — густина матеріалу резонуючого елемента,  $S_{pe}$  — площа поверхні резонуючого елемента, яка задіяна у коливальному процесі,  $h$  — його товщина,  $v_0$  — максимальна швидкість руху резонуючого елемента;  $v_c$  — швидкість руху частинок пружного середовища у пневмокамері під час проходження резонуючого елемента нейтрального положення;  $c_{pe}$  — жорсткість пружних елементів резонуючого елемента. Множник 2 в чисельнику виразу для  $T_{nc}$  та  $\Delta U_{nc}$  означає, що згідно з рис. 3 обабіч резонуючого елемента знаходяться дві однакові пневмокамери 3.

Розподіл швидкостей частинок газу по товщині зазору (координаті  $y$  на рис. 2, а) апроксимуємо функцією  $v_c(y) = v_0 [1 - (y/\delta)^2]^2$ , котра задовільняє умову непроникності поверхонь резонуючого елемента та газонепроникного екрану ( $v_c(0) = v_0$ ,  $v_c(\delta) = 0$  [10]), і знайдемо інтеграл із виразу (13)

$$\int_V v_c^2 dV = \int_0^\delta v_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right]^4 S_{pe} dy \approx 0.35 \rho_r S_{pe} \delta. \quad (15)$$

Враховуючи, що для автоколивального режиму роботи ПМР  $v_0^2 = \omega^2 w_m^2$  [10], підставимо вирази (12) до виразу (11), зробимо нескладні перетворення з урахуванням рівнянь (10), (13)–(15) і отримаємо необхідний вираз для квадрата частоти коливань ПМР:

$$\omega^2 = \left( \omega_0^2 + \frac{2\gamma P_b}{k_s \rho_0 h \delta} \right) \frac{1}{1 + \eta_m},$$

де  $\omega_0^2 = c_{pe}/m_{pe}$ ,  $k_s = S_{pe}/S_{e\phi}$  — коефіцієнт ефективної площини;  $\eta_m = \rho_r \delta / (\rho_0 h)$  — коефіцієнт впливу приєднаної маси на частоту коливань ПМР.

**ВПТ з резонуючим елементом із розподіленими параметрами.** Розглянемо спочатку ВПТ з резонуючим циліндром, запропонований у роботі [2] (рис. 4). Внаслідок антисиметричності відносно вузлових ліній 7 процесу перетікання газу між пучностями коливань 8 тиск у кільцевому зазорі 3 на вузлових діаметрах майже незмінний та дорівнює тиску подаваного до зазору газу  $P_b$ . Тоді зазор поділяється на незалежні ділянки або пневмокамери, допустима величина зазору для котрих повністю характеризує перетікання газу по зазору в цілому. Звичайно  $\delta < R_0$ , і тому можна замінити ділянку циліндра між сусідніми вузловими лініями 7 на ЕПП довжиною  $L = \pi R_0/n$  (розмір ділянки по

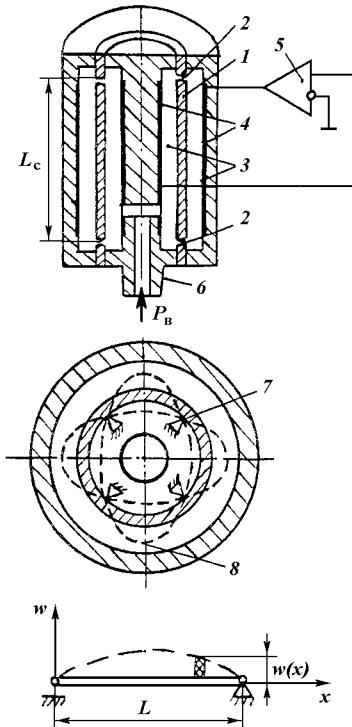


Рис. 4. ВПТ з резонуючим циліндром (див. текст та позначення на рис. 1)

колу), де  $R_0$  — радіус циліндра,  $n$  — число вузлових діаметрів, та ширину  $b = L_c$ , де  $L_c$  — довжина циліндра вздовж твірної, і площею робочої поверхні  $S_d = LL_c$ . Задля механічної розв'язки циліндра із основою намагаються зробити також  $L_c > R_0$  [5], а значить,  $L_c > L$ , і тому відтоками газу у осьовому напрямку можна занехтувати. Тоді маємо пневмокамеру з ЕПП, що описується виразом (8) з  $k^* \approx 2.45$ . Підставляємо вираз для довжини  $L$  у вираз для  $[\delta]$  із нерівності (8) і отримуємо

$$[\delta] = \frac{k^* \pi R_0}{n} \sqrt{\frac{\nu \omega_0}{c_{sb}^2}} \approx 7.7 \frac{R_0}{n} \sqrt{\frac{\nu \omega_0}{c_{sb}^2}}.$$

Цей вираз дає значення допустимого зазору, близькі до тих, що визначаються за більш точною емпіричною формулою, отриманою в роботі [2]:

$$[\delta]_T = k_T^* \frac{R_0}{n} \sqrt[3]{\frac{\nu f_0}{c_{sb}^2}},$$

де  $f_0 = \omega_0/(2\pi)$ ,  $k_T^* = 2\dots 6$ . Наприклад, для  $f_0 = 4$  кГц,  $R_0 = 6.85 \cdot 10^{-3}$  м,  $\nu = 1.32 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $c_{sb} = 332$  м/с (при  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ),  $n = 2$ ,  $w_0 = 2\pi f_0 = 2.52 \cdot 10^4$  рад/с;  $[\delta] \approx 49$  мкм, і якщо узяти із

представленого в [2] діапазону значення  $k_{\text{T}}^* = 2$ , то  $[\delta]_{\text{T}} \approx 56$  мкм. Як бачимо, відносна похибка розрахунку складає 12.5 %.

Зауважимо, що приблизна формула дає трохи заниженні результати (значення  $k_{\text{T}}^*$  більше до нижньої межі діапазону) внаслідок нехтування кривизною циліндра та газонепроникного екрану, яка збільшує реальний опір перетіканню газу, тому ПМР з допустимим зазором, підрахованим за приблизною формулою, буде напевно роботоздатною. До того ж, користуючись приблизною формулою для  $[\delta]$ , можна отримати просту аналітичну залежність допустимого зазору від конструктивних параметрів резонуючого циліндра. Підставляючи в ній вираз для частоти коливань циліндра у вакуумі [5]

$$\omega_0 \approx \frac{n^2}{R_0^2} \sqrt{\frac{D}{\rho_0 h}}, \quad (16)$$

де  $D = E_0 h^3 [12(1 - u^2)]^{-1}$  — циліндрична жорсткість циліндра,  $\rho_0$ ,  $E_0$  та  $u$  — густина, модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу циліндра, отримаємо

$$[\delta] \approx 4.13 \sqrt{h} \sqrt{\frac{\gamma}{c_{\text{зв}}^2}} \sqrt[4]{\frac{E_0}{\rho_0(1 - u^2)}}.$$

Як бачимо, для практики досить знати, що допустимий зазор ПМР ВПТ з циліндричним резонатором залежить від кореня квадратного від товщини резонатора та слабо залежить від властивостей його матеріалу.

При коливаннях резонуючого циліндра на згин (рис. 4) відхилення його серединної поверхні вздовж вузлових діаметрів 7 будуть величинами другого порядку малості відносно амплітуди зміни радіусів пучностей 8, і ними можна нехтувати, умовно вважаючи циліндр шарнірно закріпленим вздовж вузлових ліній. ЕПП тоді є шарнірно закріпленою на двох протилежних краях і вільною по двох інших ( $L_0 > R_0$ ), при цьому частота коливань вибраної ЕПП у вакуумі [10] і справді досить близька до частоти коливань циліндра в вакуумі [5]. Форма циліндричного прогину ЕПП під час коливань описується виразом  $w(x) = w_m \sin(\pi x/L)$  [7], де  $x$  — координата, що відраховується від одного з шарнірно закріплених країв до іншого, а витіснений нею об'єм становить

$$\Delta V = \int_0^L w_m \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right) L_c dx = \frac{2}{\pi} w_m S_d.$$

Жорсткість пружного середовища згідно з формuloю (9)

$$c_{\text{nc}} = \frac{2}{\pi} \frac{\gamma}{\delta} P_b S_d. \quad (17)$$

Швидкість кожної точки ЕПП  $v_n$  змінюється у відповідності до форми її прогину:  $v_n(x) = dw(x)/dt = v_0 \cos(\pi x/L)$ , де  $v_0 = dw_n/dt$ , тому швидкість частинок пружного середовища змінюватиметься в залежності і від товщини (координата  $y$ ), і від довжини (координата  $x$ ) пневмокамери:  $v_c = v_0 [1 - (y/\delta)^2] \cos(\pi x/L)$ . Відповідно система рівнянь (13) для ЕПП матиме вигляд

$$T_{\text{pe}} = \omega^2 \Theta_{\text{pe}}, \quad T_{\text{nc}} = \omega^2 \Theta_{\text{nc}}, \quad (18)$$

де

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{pe}} &= \frac{b\rho_0 h}{2} \int_0^L w_m^2 \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx = \frac{\rho_0 h}{2} S_d \frac{w_m^2}{2}, \\ \Theta_{\text{nc}} &= 2\rho_r b \int_0^\delta \int_0^L \frac{w_m^2}{2} \left[1 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2\right]^4 \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) dxdy = \\ &= 0.35\rho_r \delta S_d \frac{w_m^2}{2}. \end{aligned}$$

Знову підставляючи вирази (14) та (18) до формул (12) з урахуванням виразу для  $c_{\text{nc}}$  (17), а ті, в свою чергу, — до рівняння балансу енергій (11), отримуємо вираз для квадрата власної частоти коливань ПМР:

$$\omega^2 = \frac{\Delta U_{\text{pe}} + \Delta U_{\text{nc}}}{\Theta_{\text{pe}} + \Theta_{\text{nc}}} = \left(\omega_0^2 + \frac{2k_p P_b}{\rho_0 h \delta}\right) \frac{1}{1 + \eta_m}, \quad (19)$$

де  $k_p = 4\gamma/\pi$ ,  $\eta_m = \Theta_m/\Theta_{\text{pe}} = 0.7\rho_r \delta / (\rho_0 h)$ ,  $\omega_0^2 = \Delta U_{\text{pe}}/\Theta_{\text{pe}}$  — добре відомий квадрат власної частоти коливань циліндра в вакуумі [5], котра відповідає виразу (16). Якщо не враховувати впливу приєднаної маси (коефіцієнта  $\eta_m$ ), то вираз (16) повністю збігається з емпіричним [2], а значення коефіцієнта  $k_p$  є близьким до значення, знайденого експериментально [2] (для повітря та багатьох інших газів  $\gamma = 1.4$  і  $k_p = 1.8 \approx 2$ ).

Хоча обрана нами формальна методика знаходження частоти коливань ПМР, заснована на законі збереження повної механічної енергії, може повністю задоволити потреби проектування ВПТ з ПМР, корисно також розглянути методику якісного рівня, що використовує заміну вихідної коливальної системи еквівалентною їй по значенню власної частоти системою із зосередженими параметрами, що складається з еквівалентної точкової маси  $m_{\text{ek}} = m_{\text{pe}} + m_{\text{np}}$  і пружини з еквівалентною жорсткістю  $c_{\text{ek}} = c_{\text{pe}} + c_{\text{np}}$ , де  $c_{\text{pe}}$  та  $m_{\text{pe}}$  — еквівалентні жорсткість та маса резонуючого елемента,  $c_{\text{np}}$  та  $m_{\text{np}}$  — його приєднані жорсткість та маса. Квадрат кругової частоти коливань еквівалентної системи [8]:

$$\omega^2 = \frac{c_{\text{ек}}}{m_{\text{ек}}} = \frac{c_{\text{pe}} + c_{\text{np}}}{m_{\text{pe}} + m_{\text{np}}}. \quad (20)$$

Проаналізуємо цю методику на прикладі ВПТ із резонуючою мембраною, запропонованого в роботі [1] (рис. 5).

Ємність пневмокамери 3 ПМР  $4\Re = \pi R_m^2 \delta_m / (\rho_r c_{3B}^2)$ , де  $R_m$  — радіус мембрани,  $\delta_m$  — стала величина зазору між мембраною 1 та газонепроникним екраном 4. Пневматичний опір капіляра 6 довжиною  $l_k$  та радіусом  $r_k$  дается виразом  $\Im = 8\eta l_k / (\pi r_k^4)$ . Маємо систему із зосередженими параметрами, електрична схема аналога котрої подібна до схеми, приведеної на рис. 2, ε, а її постійна часу

$$T_p = \Im \Re = \frac{8\nu l_k R_m^2 \delta_m}{r_k^4 c_{3B}^2},$$

звідки отримуємо умову роботоздатності для радіуса капіляра

$$r_k < [r_k] = 2 \sqrt[4]{R_m} \sqrt{\delta_m l_k} \sqrt[4]{\nu \omega_0 / c_{3B}^2}.$$

Для вільних коливань еластичної мембрани за формою з одним вузловим колом (вздовж контура защемлення мембрани) (рис. 5) прогини залежать лише від відстані, обумовленої радіусом  $r$  [10]:  $w(r) = w_m \cos [\pi r / (2R_m)]$ . Тоді витіснений мембраною об'єм

$$\Delta V = \int_0^{R_m} w_m \cos \left( \frac{\pi r}{2R_m} \right) 2\pi r dr = 4 \frac{\pi - 2}{\pi} w_m R_m^2 \approx k_v w_m S_m,$$

де  $S_m = \pi R_m^2$  — площа поверхні мембрани,  $k_v = 0.463$ . Жорсткість пружного середовища згідно з формулою (9)

$$c_{nc} = 0.463 \frac{\gamma}{\delta_m} P_b S_m. \quad (21)$$

Приєднану масу резонуючого елемента (задіяну у коливаннях масу пружного середовища)  $m_{np}$  визначимо, розділивши максимальну кінетичну енергію пружного середовища  $T_{nc}$  на половину квадрата швидкості центра мембрани  $v_0$ . Як і раніше,  $T_{nc}$  виражаемо через розподіл швидкостей частинок пружного середовища в зазорі  $v_c = v_{cp} [1 - (y/\delta_m)^2]^2$ , де  $v_{cp} = k_v v_0$  — середня за площею мембрани максимальна швидкість резонуючого елемента:

$$m_{np} = \frac{T_{nc}}{v_0^2/2} = \frac{2}{v_0^2} 2\rho_r S_m \int_0^\delta \frac{v_{cp}^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta_m} \right)^2 \right]^4 dy = 0.15 \rho_r \delta_m S_m. \quad (22)$$

Через те що форма прогинів круглої еластичної мембрани під час коливань з нижчою власною частотою близька до форми прогинів під дією

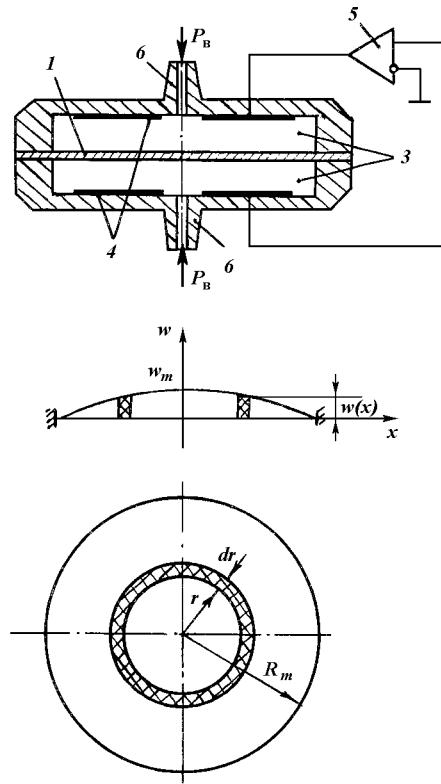


Рис. 5. ВПТ з резонуючою мембраною (див. текст та позначення на рис. 1)

перепаду тиску на ній [8], за  $c_{pe}$  краще взяти її жорсткість за тиском, тим більше що жорсткість пружного середовища в пневмокамерах теж розподілена по поверхні мембрани:

$$c_{pe} = \frac{4h\sigma_0 S_m}{R_m^2}, \quad (23)$$

де  $\sigma_0$  — попередній натяг мембрани. Еквівалентну масу резонуючого елемента приблизно знайдемо із табулюваного виразу [10] для кругової частоти вільних коливань мембрани

$$\omega_0^2 = \left( \frac{2.404}{R_m} \right)^2 \frac{\sigma_0}{\rho_0} = \frac{c_{pe}}{m_{pe}}.$$

Тобто

$$m_{pe} = 0.692 \rho_0 h S_m. \quad (24)$$

Тепер з урахуванням виразів (21)–(24) та того, що  $c_{np} = 2c_{nc}$  (діві рівні пневмокамери обабіч резонуючого елемента), формула (20) прийме вигляд

$$\omega^2 = \left( \omega_0^2 + \frac{2k_p P_b}{\rho_0 h \delta_m} \right) \frac{1}{1 + \eta_m}, \quad (25)$$

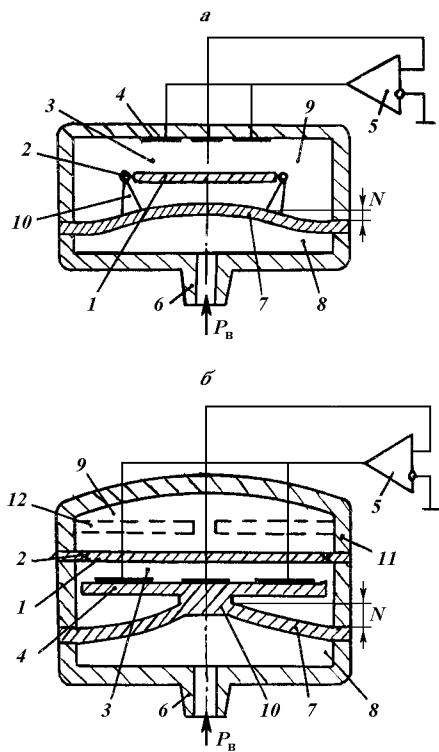


Рис. 6. ВПРТ з кільцевим резонатором (див. текст та позначення на рис. 1); а — з рухомими опорами, б — з рухомим екраном

де  $k_p = 0.67\gamma$ ,  $\eta_m \approx 0.2\rho_r\delta_m/(\rho_0 h)$ . Без урахування впливу приседданої маси  $\eta_m$  вираз (25) повністю збігається з емпіричним [1, 3] (для повітря та багатьох інших газів  $\gamma = 1.4$  і  $k_p = 0.94 \approx 1$ ).

Вимірювальні перетворювачі різниці тиску з ПМР. У вимірювальних перетворювачів різниці тиску (ВПРТ) частота коливань ПМР залежить від змінної величини щілинного зазору  $\delta$ , котра визначається прогином мембрани 7 (рис. 6) від перепаду тиску на ній між вимірюваним  $P_b$  в надмембраний 8 та незмінним  $P_0$  в підмембраний 9 порожнинах ВПРТ за посередництвом рухомих опор (жорсткого центру) 10 і зв'язаних з ними елементів ПМР.

Квадрат власної частоти коливань ПМР з кільцевим резонатором з одним газонепроникним екраном без урахування приседданої маси при умові  $k_s \approx 1$  становить

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{\gamma P_0}{\rho_0 h \delta} . \quad (26)$$

Якщо не враховувати малу зміну розтягуючих зусиль у розтяжках 2 (рис. 6, а) та кута нахилу опор, то від вимірюваного тиску залежатиме лише

величина щілинного зазору ПМР  $\delta = \delta_0 - z$ , де  $z$  — прогин опор 10 (або жорсткого центру 10) схеми на рис. 6, б),  $\delta_0$  — вихідний зазор ПМР при нейтральному положенні мембрани 7. Вибираємо мембрани 7 настільки товстою ( $R_n/\eta_n < 25$ ), щоб її прогини були пропорційні перепаду тиску на ній [6]:  $z = \text{const} \cdot \Delta P$ , де  $\Delta P = P_b - P_0$ . Параметри мембрани 7 підбираються таким чином, щоб за максимального значення вимірюваного тиску  $P_{bm}$  її прогин в точках закріплення опор (прогин жорсткого центру) 10 був максимально допустимим —  $z_0$ , звідки знаходимо невідому константу:  $\text{const} = z_0/P_{max}$ , де  $P_{max} = P_{bm} - P_0$  — максимальний перепад тиску на мембрані 7. Тепер вираз для зазору ПМР матиме вигляд  $\delta = \delta_0 - z_0 \Delta P / P_{max} = (z_0/P_{max})(P_b - P_0)$ , а вираз (26) —

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[ \delta_0 - \frac{z_0}{P_{max}} (P_b - P_0) \right]} . \quad (27)$$

Уявивши корінь квадратний із виразу (27) та ввівши нові позначення

$$K_z = \frac{\gamma P_0}{\omega_0 \rho_0 h \delta_0}, \quad D_f = \frac{K_z}{1 + \frac{z_0 P_0}{\delta_0 P_{max}}}, \\ D_u = \frac{z_0}{\delta_0 P_{max}} \frac{1}{1 + \frac{z_0 P_0}{\delta_0 P_{max}}},$$

отримуємо зручний вираз для частоти власних коливань ПМР ВПРТ:

$$\omega(P) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{D_f}{1 - D_u P_b}} .$$

Вплив приседданої маси на частоту коливань ПМР такого ВПРТ можна врахувати також за формулою для  $\eta_m$  ВПТ з кільцевим резонатором з урахуванням того, що зазори обабіч резонуючого елемента неоднакові:  $\eta_m = 0.35 \rho_r (\delta + \delta^*)/(\rho_0 h)$ , де  $\delta^* = V_{\text{заз}} / S_{\text{еф}}$  — величина приведеного зазору між резонуючим елементом і мемброю 7 (рис. 6, а) або кокшуком 11 ВПРТ (рис. 6, б),  $V_{\text{заз}}$  — об'єм цього зазору.

В табл. 1 наведені для кожної з розглянутих схем умови роботоздатності та формули для розрахунку залежності частоти коливань ПМР від вимірюваного тиску  $f(P_b) = \omega(P_b)/(2\pi)$  (без урахування приседданої маси і  $k_s \approx 1$ ), чутливості до вимірюваного тиску  $S(P_b) = df(P_b)/dP_b$  та інших необхідних для проектування ВПТ параметрів.

Таблиця 1. Основні розрахункові параметри ВПТ та ВПРТ

Базова функціональна схема	Умова роботоздатності ПМР	Приєднана жорсткість $c_{\text{pc}}$	Коефіцієнт впливу приєднаної маси $\eta_M$	Залежність частоти коливань ПМР від вимірюваного тиску $f(P_B)$	Чутливість до вимірюваного тиску $S(P_B)$
ВПТ з кільцевим резонатором (рис. 3)	$\delta < 2.45\Delta R(v\omega_0/c_{\text{SB}}^2)^{1/2}$	$2 \frac{\gamma}{\delta} S_{\text{ef}} P_B$	$\frac{0.7\rho_i\delta}{\rho_0 h}$	$f_0(1 + K_p P_B)^{1/2}, K_p = \frac{2\gamma}{\omega_0^2 \rho_0 h \delta}$	$\frac{f_0}{2} \frac{K_p}{\sqrt{1 + K_p P_B}}$
ВПРТ з резонуючим циліндром (рис. 4)	$\delta < 4.1 [hv/(c_{\text{SB}}^2)]^{1/2} \times [E_0/(\rho_0(1 - u^2))]^{1/4}$	$2 \frac{2\gamma}{\pi\delta} S_{\text{d}} P_B$	$\frac{0.7\rho_i\delta}{\rho_0 h}$	$f_0(1 + K_p P_B)^{1/2}, K_p = \frac{2k_p}{\omega_0^2 \rho_0 h \delta}, k_p = (4/\pi)\nu$	$\frac{f_0}{2} \frac{K_p}{\sqrt{1 + K_p P_B}}$
ВПТ з резонуючою мембрanoю (рис. 5)	$r_K < 2R_M^{1/2}(\delta l_K)^{1/4} \times [\nu\omega_0/(c_{\text{SB}}^2)]^{1/4}$	$2 \frac{0.463\gamma}{\delta_M} S_M P_B$	$2 \frac{0.15\rho_i\delta_M}{\rho_0 h}$	$f_0(1 + K_p P_B)^{1/2}, K_p = \frac{2k_p}{\omega_0^2 \rho_0 h \delta_M}, k_p = 0.67\nu$	$\frac{f_0}{2} \frac{K_p}{\sqrt{1 + K_p P_B}}$
ВПРТ з кільцевим резонатором (рис. 6)	$\delta < 2.45\Delta R \times [\eta\omega_0/(\gamma P_0)]^{1/2}$	$\frac{\gamma}{\delta} S_{\text{ef}} P_B$	$\frac{0.35\rho_i(\delta + \delta*)}{\rho_0 h}$	$f_0[1 + D_f/(1 - D_{\text{u}} P_B)]^{1/2}, K_z = \frac{\gamma P_0}{\omega_0^2 \rho_0 h \delta_0}, D_f = K_z/[1 + z_0 P_0/(\delta_0 P_{\text{max}})], D_{\text{u}} = z_0/(\delta_0 P_{\text{max}} \times [1 + z_0 P_0/(\delta_0 P_{\text{max}})])$	$(f_0/2) D_f D_u / [(1 - D_{\text{u}} P_B)^2 \times [1 + D_f/(1 - D_{\text{u}} P_B)]^{1/2}]$

## ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ

Проведемо чисельні оцінки залежності окремих параметрів ПМР ВПТ від вимірюваного тиску  $P_B$ . Для цього задамося:

- частотою вільних коливань резонуючого елемента у вакуумі  $f_0 = 4$  кГц,  $\omega_0 = 2\pi f_0 \approx 2.51 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>;
- діапазонами вимірюваного тиску:
  - $P_{\text{BM}} = 1.3 \cdot 10^5$  Па,  $P_0 = 0.5 \cdot 10^5$  Па;
  - $P_{\text{BM}} = 10^6$  Па,  $P_0 = 10^5$  Па;
- типом газу — повітря при температурі 0°C з  $\eta = 1.7 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с),  $\gamma = 1.402$ ,  $\rho_{\text{HV}} = 1.29$  кг/м<sup>3</sup> (при  $P_{\text{HV}} = 10^5$  Па),  $c_{\text{SB}} = 332$  м/с<sup>2</sup>;
- матеріалом резонуючого елемента та мембрани — сталь 36НХТЮ з  $\rho_0 = 7.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 1.9 \cdot 10^{11}$  Па,  $u = 0.28$ ;
- нижчою формою коливань резонуючого елемента: для мембрани — з коефіцієнтом форми  $\alpha = 2.404$ , для циліндра — з числом вузлових діаметрів  $n = 2$ ;
- необхідними розмірами  $R_2 = R_M = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_1 = 0.5 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_0 = 6.85 \cdot 10^{-3}$  м,  $\Delta R = 1.5 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 2 \cdot 10^{-4}$  м,  $\delta_M = 0.5 \cdot 10^{-4}$  м.

Величини допустимих параметрів ПМР для ВПТ та ВПРТ подані в табл. 2.

Результати розрахунків частоти  $f(P_B)$  та чутливості  $S(P_B)$  приведені на графіках рис. 7. Вплив приєднаної маси на частоти коливань ПМР  $\Delta f/f_0 \approx \eta_M/2$  в означених діапазонах не перевищує 0.005 %.

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ, ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

ВПТ з ПМР мають одноманітні характеристики у широкому діапазоні вимірюваного тиску. Наприклад, у діапазоні  $1.3 \cdot 10^5$  Па девіації частоти складають 2–3 власні частоти коливань резонуючого елемента у вакуумі  $f_0$ , чутливість ВПТ біля верхньої межі близько 0.04 Гц/Па і вища (до 0.075–0.18 Гц/Па) біля нижньої межі діапазону ( $P_B \approx 0$ ). При проектуванні ВПТ величину допустимого щілинного зазору ПМР потрібно вибирати за найбільшого тиску діапазону  $P_{\text{BM}}$  та найменшої температури подаваного газу. За таких умов згідно з виразом (6) допустимі зазори стають досить малими (табл. 2), і потрібно ставити більш жорсткі вимоги до чистоти та вологості газу.

ВПТ з ПМР доцільно використовувати як широкодіапазонні первинні перетворювачі барометричного висотоміра, а також для перевірки та градуювання інших ВПТ в лабораторних умовах.

Таблиця 2. Допустимі параметри ПМР ВПТ та ВПРТ

Верхня межа діапазону вимірювання, $P_{\text{вм}}$ , $10^5$ Па	Базова функціональна схема			
	ВПТ з кільцевим резонатором (рис. 3)	ВПТ з резонуючим циліндром (рис. 4)	ВПРТ з кільцевим резонатором (рис. 6)	ВПТ з резонуючою мембрanoю (рис. 5)
	[ $\delta$ ], мкм		[ $r_k$ ], мкм	
1.3	56	40	90	300
10	20	15	64	180

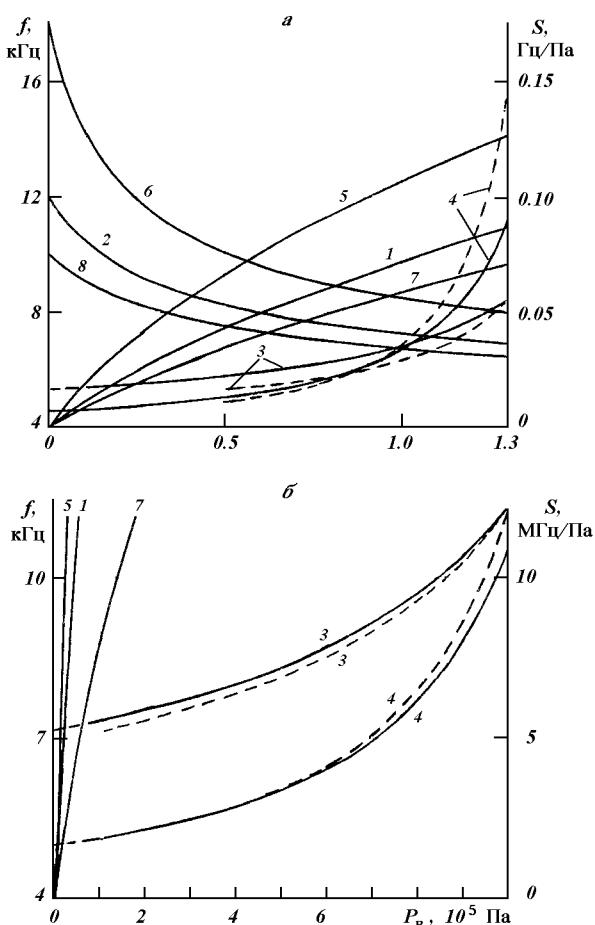


Рис. 7. Залежність частоти та чутливості від вимірюваного тиску  $P_b$ : криві 1 і 2 — частота  $f$  і чутливість  $S$  для ПМАС із кільцевим резонатором ВПТ; 3, 4 — з кільцевим резонатором ВПРТ відповідно; 5, 6 — для ВПТ із резонуючим циліндром; 7, 8 — для ВПТ із резонуючою мембрanoю

ВПРТ з пневмомеханічною автоколивальною системою малоочутливий до малого тиску, меншого за внутрішній тиск у підмембраний порожнині ВПРТ  $P_0$ , та має високу чутливість для  $P_{\text{вм}} > P_0$ . При проектуванні ВПРТ з метою підвищення корисної

девіації частоти та чутливості потрібно збільшувати величину вільного ходу  $z_0$ , наприклад, виключаючи із вимірюваного діапазону ту область, до котрої ВПРТ малоочутливий. Тоді максимальний прогин ППЕ знаходиться із умовою  $z_0 = [\delta] - \delta_{\min}$ . Графічні залежності  $f(P_b)$  та  $S(P_b)$  для цього випадку мають вигляд, показаний на рис. 7, а та б штриховими лініями. Як бачимо, за  $P_{\text{вм}} = 1.3 \cdot 10^5$  Па девіація частоти на ділянці  $P_0 \dots P_{\text{вм}}$  збільшилась на 12 %, а чутливість біля верхньої межі — більш ніж на 60 %.

ВПРТ внаслідок наявності мембрани 7 практично не піддається впливу забруднень та вологості вимірюваного середовища, а вплив температури суттєво зменшується, що дозволяє врахувати зміну температури резонуючого елемента та газу у внутрішній порожнині ВПРТ за допомогою температурного вимірювача або другої пневмомеханічної автоколивальної системи. Тому ВПРТ з ПМР доцільно використовувати як первинний перетворювач тиску швидкісного потоку в системах вимірювання висотно-швидкісних параметрів або другого тиску, вищого ніж у підмембраний порожнині, у тому числі і тиску рідини.

ВПРТ з рухомими опорами має ту перевагу, що сили електростатичної дії електродів системи збурення, що знаходяться на нерухомому екрані 4, практично не впливають на мембрани 7 внаслідок малої жорсткості пружного елемента (рис. 6, а). У ВПРТ з рухомим екраном цю проблему можна розв'язати введенням додаткового нерухомого газонепроникного екрана 12 зі зворотного боку резонуючого елемента з малим щілинним зазором  $\delta^*$ , за якого виконується умова роботоздатності ПМР (8) (рис. 6, б). Окрім цього, в електричному плані другий екран збільшує площу взаємодії резонуючого елемента з електродами системи реєстрації та системи збурення коливань ПМР удвічі у порівнянні з ВПРТ з рухомими опорами. В механічному плані цей екран дозволяє підняти початкову частоту коливань резонуючого елемента до

$$f_{01} = f_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma P_0}{\rho_0 h \delta^* (2\pi f_0)^2}},$$

тим самим збільшуючи величину вільного ходу мембрани 7 (допустимого зазору ПМР) і до певної межі збільшуючи корисну девіацію частоти. Завдяки цьому, а також механічній розв'язці мембрани та резонуючого елемента (кріпленню резонуючого елемента в нерухомій частині корпусу), ВПРТ, представлений схемою на рис. 6, б, набуває виключної технологічності виготовлення, а значить, найменшої собівартості та найбільшої перспектив-

ності його розробки у порівнянні з іншими розглянутими ВПТ з ПМР (рис. 3—6).

Отримані в статті теоретичні результати підтвердженні експериментальними дослідженнями в роботах [1—3] і можуть бути використані розробниками прецизійних ВПТ для авіаційної та ракетно-космічної техніки.

1. А. с. 228992 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L11/00. Датчик давления с частотным выходом / И. А. Горенштейн. — Опубл. 17.10.68, Бюл. № 32.—2 с.
2. А. с. 748154 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L11/00. Датчик абсолютного давления с частотным выходом / И. А. Горенштейн, В. Г. Кравцов. — Опубл. 15.07.80, Бюл. № 26.—2 с.
3. А. с. 798523 СССР, МКИ<sup>4</sup> G01L11/00. Частотный датчик давления / И. А. Горенштейн, В. Г. Кравцов. — Опубл. 23.01.81, Бюл. № 3.—2 с.
4. Бессекерский В. А., Попов Е. А. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972.—768 с.
5. Горенштейн И. А. Гидростатические частотные датчики первичной информации. — М.: Машиностроение, 1976.—184 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984.—832 с.

7. Ламб Г. Гидродинамика. — М.-Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1947.—928 с.
8. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.—320 с.
9. Раков В. А., Тимошенко В. Г. Бортовые датчики давления: // Авиационная промышленность.—1990.—№ 10.—С. 88—99.
10. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. — М.: Машиностроение, 1985.—472 с.

#### PHYSICOMATHEMATICAL MODELING OF TRANSDUSERS WITH PNEUMOMECHANICAL RESONATOR

M. G. Chernyak, O. M. Bondarenko, and T. V. Kovalenko

A physicomathematical model of the sensitivity of a pneumomechanical autovibrating system to the gas pressure is obtained. Basic functional diagrams for constructing pressure transducers based on this system are considered. Analytic expressions are obtained for the dependence of their vibrating frequency on the pressure measured and their sensitivity to pressure. Some recommendations on designing and improving of such devices are made.

УДК 681.324.001.57

# Модель функционирования бортовых вычислительных систем с категорированием задач в условиях сбоев и отказов аппаратных и программных средств

В. С. Харченко, Ю. В. Гридин

Харківський військовий університет

*Надійшла до редакції 15.10.99*

---

Досліджена модель відмовостійкої бортової обчислювальної системи з категоріюванням задач в умовах виникнення збоїв і відмов апаратних та прояву дефектів програмних засобів. Сформульовані рекомендації щодо програмно-технічної реалізації такої системи.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим элементом в составе бортового оборудования современных космических аппаратов (КА) являются цифровые управляющие и вычислительные системы (УВС). В условиях полной автономности функционирования КА на УВС возлагается решение таких ответственных задач, как обработка командно-программной информации, выполнение важных и особо важных разовых команд, выработка управляющих воздействий для различных бортовых систем и др. Очевидно, что любая неисправность, которая приводит к неправильному функционированию УВС, может являться причиной частичной или полной потери работоспособности дорогостоящего оборудования КА. Именно поэтому проблема обеспечения высокой надежности УВС КА стала доминирующей при разработке космических систем и комплексов.

Как известно, условия функционирования бортовых УВС характеризуются, прежде всего высокой интенсивностью сбоев и отказов аппаратных и про-

граммных средств (АПС), что сокращает эффективное время работы системы и приводит к еенеработоспособному состоянию. При этом особую опасность представляют отказы и сбои УВС, обусловленные проявлением дефектов программных средств, поскольку для их обнаружения и парирования требуется использование специальных архитектурных решений.

Основным направлением обеспечения работоспособности УВС в условиях сбоев и отказов АПС является синтез архитектур, обладающих свойством отказо- или дефектоустойчивости [5, 13–16]. Сегодня подавляющее большинство современных бортовых УВС строится на принципах распределенных вычислительных систем с программируемой архитектурой. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить необходимую отказоустойчивость при помощи версионной избыточности [14], предполагающей наличие резервных каналов, построенных с использованием различных программных или аппаратно-программных средств (различных математических моделей, алгоритмов, языков и субъектов

Таблица 1. Модели решаемых задач

Категория задачи $K_j$	Приоритет задачи $\Pi_j$	Выделяемые ресурсы (кол-во вычислителей) $R_j$	Признак многоверсионности программных средств	Обнаруживаемые неисправности при мажоритарной обработке	Возможность исправления ошибок при мажоритарной обработке
1	1—5	1	—	нет	нет
2	1—5	2	—	аппаратные сбои и отказы	нет
3	1—5	2	+	аппаратные сбои и отказы, программные дефекты	нет
4	1—5	3	—	аппаратные сбои и отказы	есть
5	1—5	3	+	аппаратные сбои и отказы, программные дефекты	есть

программирования, аппаратных платформ и т. д.) и имеющих одинаковые вход-выходные характеристики [15].

В [6] предложен метод обеспечения отказоустойчивости, получивший название категорирования. Данный метод заключается в динамическом выделении избыточных вычислительных ресурсов в сочетании с многоприоритетной дисциплиной обслуживания решаемых задач. При этом понятие категории задачи определялось из требований к надежности и достоверности ее реализации в условиях сбоев и отказов АПС.

Целью данной работы является усовершенствование разработанной в [6] математической модели системы с категорированием задач и ее исследование в условиях сбоев и отказов АПС.

#### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УВС С КАТЕГОРИРОВАНИЕМ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ СБОЕВ И ОТКАЗОВ АПС

В общем случае модель УВС с категорированием задач (УВСК) состоит из трех составляющих: модели архитектуры, моделей обслуживаемых (решаемых) задач и модели дисциплины обслуживания. Для анализа работы УВСК в условиях сбоев и отказов АПС необходима еще одна составляющая — модель неисправностей.

В качестве модели, описывающей архитектуру и топологию связей, примем ПМЧ-модель [12]. В ней система представляется графом  $G(B, E)$  без петель, где  $B$ ,  $E$  — пара конечных множеств. Множество  $B = \{B_1, \dots, B_n\}$  соответствует вычислителям системы, а множество дуг  $E = \{E_1, \dots, E_m\}$  — информационным дугам. Введем следующие определения.

**Определение 1.** УВСК будем называть распределенную многопроцессорную вычислительную систему, состоящую из однородных вычислителей  $B_i$  ( $i = 1, \dots, n_B$ ), которые при выполнении распределенного вычислительного процесса реализуют принци-

пы многоверсионных вычислений в сочетании с многоприоритетной дисциплиной обслуживания категорированных задач (заявок).

**Определение 2.** Под вычислителем  $B_i$  ( $i = 1, \dots, n_B$ ) будем понимать  $i$ -й элемент (узел, микропроцессор, вычислительный модуль и т. п.) УВСК, который выполняет распределенный вычислительный процесс.

С учетом многоверсионности вычислений модели задач  $Z_j$  ( $j = 1, \dots, n_3$ ) представим в виде, показанном в табл. 1.

Рассмотрим теперь модель дисциплины обслуживания задач  $Z_j$ . Согласно [7], дисциплина обслуживания — это такое правило приоритета  $\Pi_j$ , которое определяет относительное расположение задачи  $Z_j$  в очереди, т. е. очередьность ее решения по отношению к другим.

В системах с фиксированными приоритетами это означает, что задача с приоритетом  $\Pi_j$  считается более срочной, чем задача с приоритетом  $\Pi_{j-1}$ , т. е.  $\Pi_j > \Pi_{j-1}$ .

**Определение 3.** Под многоприоритетной дисциплиной обслуживания задач  $Z_j$  будем понимать такое правило приоритета  $\Pi$ , в котором число приоритетов больше двух.

**Определение 4.** Под категорированием задач  $Z_j$  будем понимать такое правило сопоставления  $K$ ,  $R$  и  $\Pi$ , при котором выполняются следующие условия:  $R_j \geq R_{j-1}$ ,  $\Pi_j > \Pi_{j-1}$  или  $K_j(R_j, \Pi_j) > K_{j-1}(R_{j-1}, \Pi_{j-1})$ .

Назначение категорий  $K_j$  задачам  $Z_j$  позволяет обеспечить не только необходимую отказоустойчивость выбранных в УВСК конфигураций, но также минимизировать временные задержки при решении задач  $Z_j$  путем реализации многоприоритетной дисциплины обслуживания. Условия в определении 4 демонстрируют частный случай, так как в общем случае при категорировании задач распределение их приоритетов может быть задано в произвольном порядке по отношению к категориям.

Принятую выше модель УВСК можно рассматри-

вать как систему массового обслуживания (СМО) [8, 9] при следующих допущениях:

1) в систему поступает экспоненциальный поток задач  $Z_j$  ( $j = 1, \dots, n_3$ ) категорий  $K_j$  ( $j = 1, \dots, 5$ ) с интенсивностями  $\lambda_j = \lambda$ , что соответствует равномерному распределению задач различных категорий в потоке;

2) интенсивности обслуживания задач  $Z_j$  равны, т. е.  $\mu_j = \mu$ ;

3) при обслуживании задач реализуется много-приоритетная дисциплина обслуживания с относительными фиксированными приоритетами;

4) обработка потока задач  $Z_j$  осуществляется в условиях их информационной независимости;

5) число вычислителей  $B_j$  в системе бесконечно, т. е.  $n_B \rightarrow \infty$ .

Как показано в [6], граф состояний такой СМО имеет древовидную структуру. Вероятность нахождения системы в состоянии решения  $n_3$  задач различных категорий определяется выражением

$$p(n_3) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \left(1 - \frac{5\lambda}{\mu}\right), \quad n_3 \geq 0. \quad (1)$$

Рассмотрим тривиальный случай. Согласно [6] нормирующее условие для УВСК имеет вид

$$\sum_{n_3=0}^{\infty} 5^{n_3} p(n_3) = 1. \quad (2)$$

С учетом (1), (2) можно записать

$$\sum_{n_3=0}^{\infty} 5^{n_3} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \left(1 - \frac{5\lambda}{\mu}\right) = 1. \quad (3)$$

Расчеты, проведенные по формуле (3) для  $n_3 = 0, \dots, 4$ , сведены в табл. 2. Видно, что при  $5\lambda/\mu < 0.4$  состояниями с  $n_3 > 2$  можно пренебречь, так как вероятность нахождения в них УВСК очень мала (так, например,  $p(2) = 0.00384$  при  $5\lambda/\mu = 0.4$ ).

Таблица 2. Значения вероятности  $5^{n_3} p(n_3)$  для разного числа задач  $n_3$

$n_3$	$5\lambda/\mu$				
	0.2	0.4	0.6	0.8	0.999
0	0.8000	0.6000	0.4000	0.2000	0.0010
1	0.1600	0.2400	0.2400	0.1600	0.0010
2	0.0320	0.0960	0.1440	0.1280	0.0010
3	0.0064	0.0384	0.0864	0.1024	0.0010
4	0.0013	0.0154	0.0518	0.0819	0.0010
$\sum_0^1 5^{n_3} p(n_3)$	0.9600	0.8400	0.6400	0.3600	0.0020
$\sum_0^2 5^{n_3} p(n_3)$	0.9920	0.9360	0.7840	0.4880	0.0030

Следовательно, имеет место предел

$$\lim_{\frac{5\lambda}{\mu} \rightarrow 0} \sum_{n_3=0}^{\infty} p(n_3) = 0. \quad (4)$$

Как следствие из (4) для любого  $n_3 \neq 0$  справедливо

$$\lim_{\frac{5\lambda}{\mu} \rightarrow 0} p(n_3) = 0. \quad (5)$$

Очевидно, что данный подход позволяет существенно упростить структуру графа состояний УВСК.

В качестве моделей неисправностей АПС рассмотрим логические модели, позволяющие учитывать кратковременные неисправности типа аппаратных сбоев и программных дефектов [13]. Даные модели основываются на проявлении дефекта (физического или логического) в виде неправильных значений сигналов (данных) на выходах вычислителей.

Анализ УВСК в условиях неидеальной надежности АПС будем проводить при следующих условиях:

1) потоки сбоев и отказов АПС имеют пуассоновское распределение;

2) за время решения задачи  $Z_j$  категории  $K_j$  может возникнуть не более одной неисправности, и только в одном вычислителе;

3) процесс восстановления вычислителей будем описывать величиной  $\mu_B$  — интенсивностью восстановления, которая определяется временем перезагрузки задачи в свободный вычислитель и ее решения;

4) в роли восстанавливающего органа будем использовать любой свободный вычислитель. При этом будем считать, что его аппаратная и програмmaticя часть, выполняющая функции контроля и восстановления, обладает идеальной надежностью, по крайней мере в течение времени, необходимого для их реализации [10, 11].

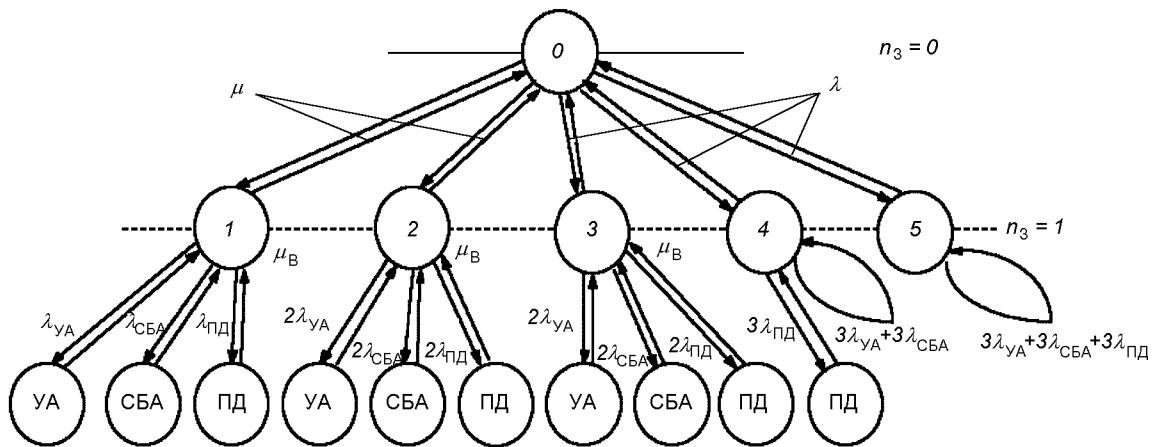


Рис. 1. Граф состояний УВСК; УА и СБА — состояния аппаратного устойчивого отказа и сбоя, ПД — состояние проявления программного дефекта; цифрами 0, 1, ..., 5 обозначены исходное состояние и состояния решения задач пяти категорий

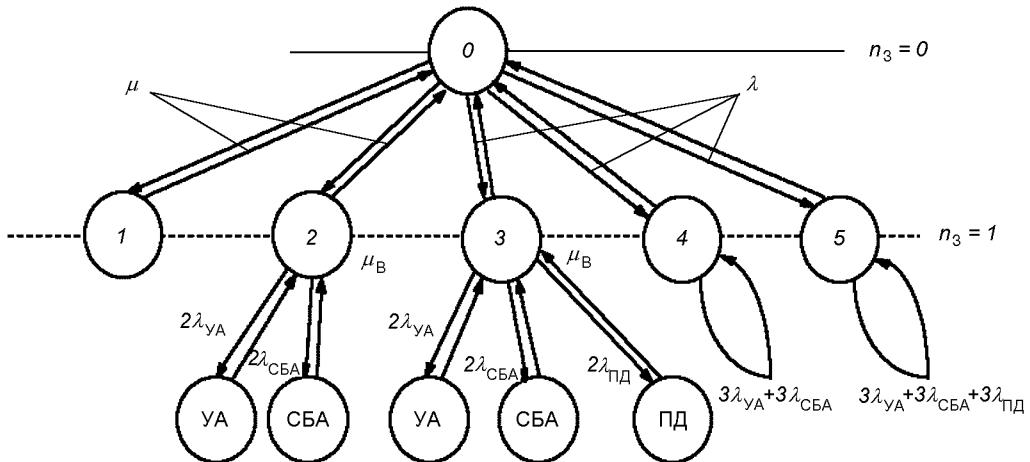


Рис. 2. Упрощенный график состояний УВСК

Граф состояний УВСК можно представить в виде, показанном на рис. 1.

Сопоставление графа состояний и табл. 1 позволяет сделать вывод, что для получения оптимистической оценки надежности УВСК можно исключить ряд состояний графа, если принять следующие предположения:

- 1) при решении задач первой категории вероятность появления неисправностей АПС ничтожно мала и ею можно пренебречь;
- 2) в одноверсионных конфигурациях УВСК используются высоконадежные программные средства.

Принятые предположения позволяют перейти к упрощенному графу состояний УВСК (рис. 2).

#### АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УВСК

Анализ матрицы переходов для графа состояний (рис. 2) позволяет получить следующую систему уравнений, описывающих работу УВСК в стационарном режиме (при  $t \rightarrow \infty$ ):

$$\begin{cases} p(1) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) p(0), \\ p_{УA}(1) = \left(\frac{2\lambda_{УA}}{\mu_B}\right) p(0), \\ p_{СБА}(1) = \left(\frac{2\lambda_{СБА}}{\mu_B}\right) p(0), \\ p_{ПД}(1) = \left(\frac{2\lambda_{ПД}}{\mu_B}\right) p(0), \\ p(0) + 5p(1) + 2p_{УA}(1) + 2p_{СБА}(1) + 2p_{ПД}(1) = 1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $p_{\text{УА}}(1)$ ,  $p_{\text{СБА}}(1)$  и  $p_{\text{ПД}}(1)$  — вероятности нахождения УВСК в состояниях проявления аппаратного отказа, сбоя и программного дефекта соответственно;  $\lambda_{\text{УА}}$ ,  $\lambda_{\text{СБА}}$  и  $\lambda_{\text{ПД}}$  — интенсивности потоков аппаратных отказов, сбоев и программных дефектов.

Из уравнений (6) получаем выражение

$$p(0) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu} \left[ 5 + 4 \frac{\lambda_{\text{УА}}}{\mu_B} + 4 \frac{\lambda_{\text{СБА}}}{\mu_B} + 2 \frac{\lambda_{\text{ПД}}}{\mu_B} \right]}. \quad (7)$$

Введем множитель

$$\beta_{\text{АПС}} = 5 + 4 \frac{\lambda_{\text{УА}}}{\mu_B} + 4 \frac{\lambda_{\text{СБА}}}{\mu_B} + 2 \frac{\lambda_{\text{ПД}}}{\mu_B} \quad (8)$$

и назовем его коэффициентом потерь производительности УВСК. Из (8) видно, что область значений коэффициента  $\beta_{\text{АПС}}$  лежит от 5 до 15. Случай  $\beta_{\text{АПС}} = 5$  соответствует УВСК с идеальной надежностью, а случай  $\beta_{\text{АПС}} = 15$  — критическому режиму. Рассмотрим влияние коэффициента  $\beta_{\text{АПС}}$  на такой показатель надежности УВСК, как коэффициент готовности. Согласно графа состояний и уравнений (6) коэффициент готовности УВСК можно найти по формуле

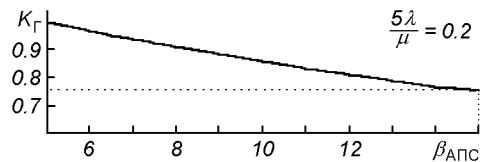


Рис. 3. Зависимость  $K_{\Gamma}$  от коэффициента  $\beta_{\text{АПС}}$

$$K_{\Gamma} = p(0) + 5p(1), \quad (9)$$

которая после подстановки выражений для  $p(0)$ ,  $p(1)$  и  $\beta_{\text{АПС}}$  преобразуется к виду

$$K_{\Gamma} = \frac{1 + 5\lambda/\mu}{1 + \beta_{\text{АПС}} \lambda/\mu}. \quad (10)$$

Зависимость (10) представлена на рис. 3.

Видно, что величина  $\beta_{\text{АПС}}$ , зависящая от соотношений интенсивностей сбоев и отказов АПС и интенсивности восстановления, может привести к снижению коэффициента готовности УВСК на 25 %.

Необходимо отметить, что рассмотренная выше модель функционирования УВСК также применима

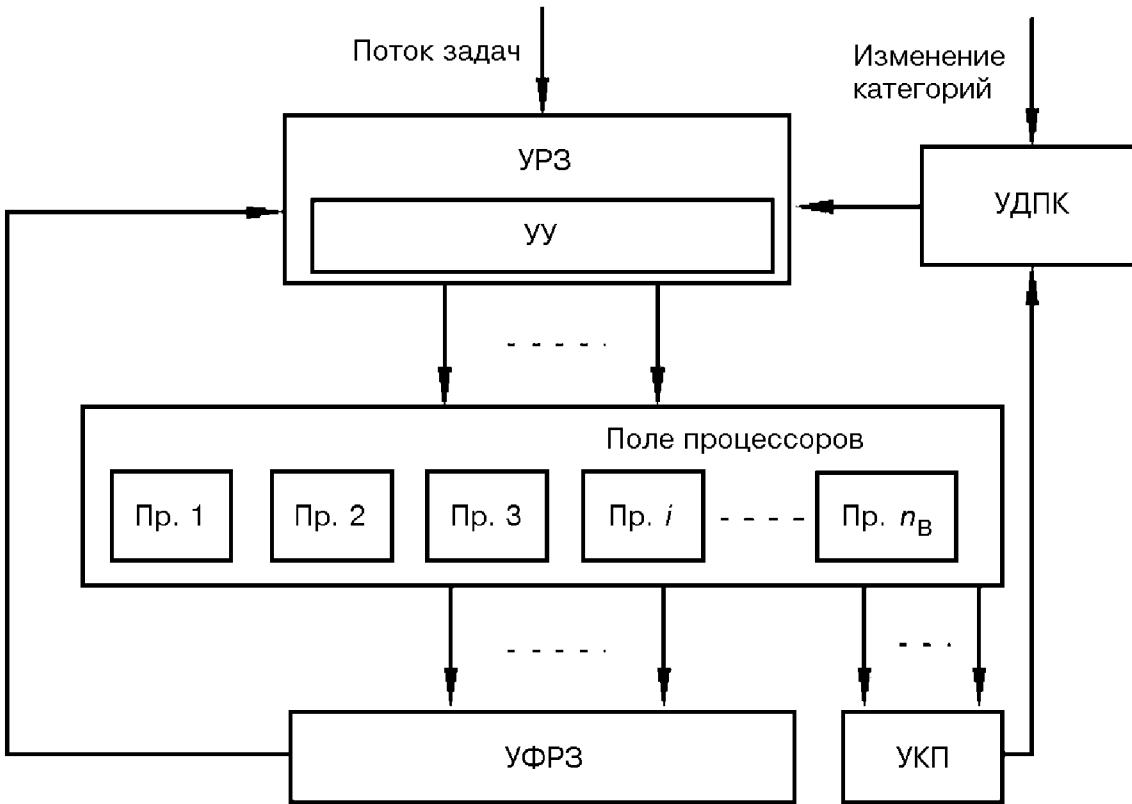


Рис. 4. Структурная схема УВСК

для случаев, когда число вычислителей  $n_B$  конечно, при предположении, что аппаратные отказы не приводят к полной потере работоспособности вычислителей. Без этого предположения в УВСК будут иметь место деградационные процессы, приводящие к снижению производительности системы и появлению очередей к вычислительным ресурсам.

Тем не менее, в процессе деградации требуемая надежность и достоверность функционирования УВСК может поддерживаться механизмом динамического переназначения категорий.

#### ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ УВСК

Принципы возможной программно-аппаратной реализации и варианты технических решений отдельных устройств отказоустойчивой УВСК описаны в [1–4].

В общем виде структурная схема УВСК показана на рис. 4. В ее состав входят следующие основные элементы:

- устройство распределения задач УРЗ, включающее в себя централизованное или децентрализованное устройство управления УУ и обеспечивающее распределение категорированных задач с учетом их приоритетов на поле процессоров (вычислителей) с возможностью дообслуживания задач при отказах или сбоях АПС [9];
- поле процессоров, которые под управлением УРЗ объединяются в конфигурации, обеспечивающие требуемую надежность функционирования. Конфигурации строятся с учетом многоверсионности программного обеспечения и поддержания в готовности к подключению резервных процессоров [2, 3];
- устройство формирования результатов выполнения задач УФРВЗ, осуществляющее их анализ путем сравнения наборов выходных данных процессоров в выбранной УРЗ конфигурации с учетом возможной деградации системы по показателю производительности [2, 4];
- устройство контроля процессоров (УКП), которое обеспечивает оперативный контроль их работоспособности;
- устройство динамического переназначения категорий (УДПК), предназначенное для изменения категорий задач по командам извне (при изменении целей или условий функционирования УВСК) либо для их снижения при возрастании числа отказавших процессоров, приводящего к недопустимому увеличению времени выполнения задач.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим достоинства и недостатки разработанной выше модели функционирования УВСК. К основным достоинствам следует отнести простоту модели и возможность оценки основных показателей УВСК на этапе проектирования с учетом неисправностей АПС. Недостатком является то, что данная модель применима для анализа УВСК только с малыми значениями  $5\lambda/\mu$  (что следует из табл. 2), т. е. для УВСК, работающих в режиме реального времени. Это обусловлено тем, что в других случаях необходимо учитывать переходы в состояния с  $n_3 > 1$ , что, в свою очередь, существенно усложняет граф возможных состояний УВСК. Однако этот недостаток не является критичным для систем рассматриваемого класса в течение времени нормальной эксплуатации.

В целом разработанные математические модели и результаты их анализа можно рассматривать как основу для создания методики оценки и выбора параметров отказоустойчивых многопроцессорных систем с категорированием задач в условиях сбоев и отказов аппаратных и программных средств.

Для систем КА с длительным временем активного функционирования, допускающих деградацию (снижение производительности либо снижение требований к надежности и достоверности выполняемых задач), целесообразно использовать предложенную структурную схему адаптивной УВСК и варианты технической реализации ее отдельных устройств. В этом случае необходимо исследовать модели УВСК с динамическим переназначением категорий.

1. А. с. 1524052 СССР, МКИ G06F9/46. Устройство для распределения заданий процессорам / Г. Н. Тимонькин, Д. В. Дмитров, С. Н. Ткаченко, В. С. Харченко. — Опубл. 24.03.88, Бюл. № 43.
2. А. с. 1653448 СССР, МКИ G06F11/18, H05K10/00. Многопроцессорная резервированная система / В. С. Харченко, В. А. Ткаченко, Г. Н. Тимонькин и др. — Опубл. 03.07.89, Бюл. № 11.
3. А. с. 1753476 СССР, МКИ G0F15/16. Резервированная вычислительная система / В. С. Харченко, А. В. Бек, М. А. Чернышов и др. — Опубл. 23.01.90, Бюл. № 29.
4. А. с. 1819116 СССР, МКИ H05K10/00, G06F11/18. Трехканальная резервированная система / В. А. Ткаченко, Г. Н. Тимонькин, В. С. Харченко и др. — Опубл. 18.09.89, Бюл. № 20.
5. Генинсон Б. А., Панкова Л. А., Трахтенгерц Э. А. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 5. — С. 3–18.
6. Гридин Ю. В., Харченко В. С. Обработка измерительной информации в бортовых отказоустойчивых телеметрических системах с категорированием заявок // Космічна наука и технологія. — 1999. — 5, № 1. — С. 69–73.

7. Клейнрок Л. Коммуникационные сети (стохастические потоки и задержки сообщений). — М.: Наука, 1970.—256 с.
8. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: Пер. с англ./Под ред. В. И. Неймана. — М.: Машиностроение, 1979.—432 с.
9. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979.—600 с.
10. Лобанов А. В. Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей на основе глобального синдрома // Автоматика и телемеханика.—1996.—№ 5.—С. 150—159.
11. Лобанов А. В. Метод распределенного мажорирования информации с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи зарубежной радиоэлектроники.—1997.—№ 6.
12. Микеланде М. А. Развитие основных моделей самодиагностирования сложных технических систем // Автоматика и телемеханика.—1995.—№ 4.—С. 3—18.
13. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М.: Радио и связь, 1989.—208 с.
14. Харченко В. С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. — Харьков: МО Украины, 1996.—502 с.
15. Харченко В. С. Выбор технологии проектирования и базовых архитектур дефектоустойчивых цифровых управляющих и вычислительных систем реального времени // Космічна наука і технологія.—1997.—№ 5/6.—С. 109—119.
16. Харченко В. С., Благодарний М. П. Організація багатоальтернативних асинхронних обчислень у цифрових системах літальних апаратів і комплексів // Наука і оборона.—1994.—№ 3.—С. 153—161.

---

**THE MODEL OF OPERATION OF SPACECRAFT BOARD COMPUTER SYSTEMS WITH REQUEST CATEGORIZATION TAKING INTO ACCOUNT HARDWARE AND SOFTWARE FAULTS**

**V. S. Kharchenko and Yu. V. Gridin**

The model of fault-tolerant board computer system with request categorization (CSRC) is studied with different kinds of hardware and software faults are researched taken into account. The structure and different variants of technical realization of CSRC elements are proposed.

УДК 581.17:581.84

Гравітропна реакція протонеми моху  
*Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb.  
та її модифікації світлом

О. Я. Хоркавців, О. Т. Демків

Інститут екології Карпат НАН України, Львів

Надійшла до редакції 25.10.99

Проведено порівняльні дослідження граві- та фототропізму протонеми двох видів мохів: *Pohlia nutans* і добре вивченого *Ceratodon purpureus*. У темряві протонема обох видів виявила негативний гравітропізм. В умовах постійного освітлення протонема росла радіально по поверхні субстрату, а бокове світло індукувало позитивний або негативний фототропізм. Характер фототропізму залежав від інтенсивності світла: низька інтенсивність стимулювала позитивний фототропізм, а висока — негативний. Встановлена різна ростова реакція протонеми обох видів на монохроматичне світло: на синьому світлі фототропний згин здійснювався плавно і поступово, а на червоному — різко. Виявлена також залежність фототропної реакції від чергування синього і червоного світла: 10 хв освітлення для послідовності червоне — синє виявилося ефективнішим, ніж для послідовності синє — червоне світло. Очевидно, що дія червоного і синього світла зумовлена змінами цитозольного  $\text{Ca}^{2+}$  як найшвидшої реакції на світло. Гравітропна реакція протонеми, що виросла на червоному світлі, проявилася слабше і пізніше, ніж протонеми із синього світла.

Протонема мохів стала зручним об'єктом для дослідження ролі гравітації у ростових і формотворчих процесах рослин [4, 15, 16, 29, 31, 32] у зв'язку з тим, що сприйняття і реалізація граві- та фотостимулів в протонемі відбувається в єдиній апікальній клітині, що дає можливість досліджувати природу взаємозв'язків світла і гравітації у різних експериментальних умовах на клітинному рівні. Гравітропізм протонеми описаний лише у чотирьох видів мохів: *Ceratodon purpureus* [18]; *Physcomitrella pattens* [23]; *Funaria hygrometrica* [33] та *Pottia intermedia* [15], хоча гравітропна орієнтація гаметофіту і спорофіту властива багатьом з мохів [24].

*Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. є новим видом у досліджені ролі гравітації у ростових і формотворчих процесах. У всіх видів мохів гравітропізм

здійснюється за участю аміопластів, седиментація яких під впливом гравітаційного поля Землі призводить до внутрішньоклітинної анізотропії і просторової переорієнтації росту [4, 31].

Плагіотропний ріст протонеми мохів (по субстрату) на світлі [13] і негативно гравітропний у темряві [18] стали підставою для досліджень взаємопливів світла й гравітації на просторову орієнтацію росту протонеми. Виявилося, що напрям росту протонеми контролюється щонайменше трьома стимулами, відповідальними за фото-, граві- та автотропізм, а взаємодія граві- та фотостимулів залежить не тільки від інтенсивності, але й від кольору, зокрема синього і червоного [4, 16].

Мета нашої роботи — дослідити природу гравітропізму протонеми *Pohlia nutans* та особливості його модифікації світлом.

## МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджувався гравітропізм двох видів листяних мохів: *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb і *Ceratodon purpureus* Brid. Стерильну культуру мохів одержували зі спор, висіяних на агаризоване середовище Кнopa. Рослини вирощували у люмінестаті в контролюваних умовах чергування 16 год світлового і 8 год темнового періоду освітлення ( $25-30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), температури ( $20-22^\circ\text{C}$ ) і вологості ( $85-90\%$ ). Семиденну протонему знімали препарувальною голкою з агару і у вигляді клубка ниток переносили у нові чашки на свіже середовище, в яке додавали  $0.2\%$  глукози. Чашки поміщали у чорні пакети і ставили вертикально. Через 7—8 днів утворювалася густа дернина паралельно орієнтованих прямих столонів. Одержану протонему дернина була піддослідним матеріалом в усіх експериментах.

Для аналізу післядії світла на гравічувливість протонеми *P. nutans* чашки з протонемою світили зверху через отвір у чорній коробочці протягом 4 год червоним або синім світлом однакової інтенсивності  $11 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Після насвітлення отвір закривали, повертали коробочки на  $90^\circ$ , так що протонема знаходилася у горизонтальному положенні, і для відновлення негативного гравітропізму у темряві повинна була загинатися доверху.

Монохроматичне світло одержували від двох джерел світла: ртутної лампи СВД-120А з світлофільтром ФС-1 ( $\lambda = 405 \text{ нм}$ ) та лампи розжарення з інтерференційним світлофільтром ( $\lambda = 660 \text{ нм}$ ). Освітлення на рівні культур вирівнювали до  $11 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$  за допомогою спектрорадіометра Li-Cor Li-1800. Інтенсивність освітлення регулювали також віддаллю між лампами і культурою.

Величина кута згину верхівок апікальних клітин була параметром, за допомогою якого оцінювали ефективність гравітації та світла, а також їхню взаємодію. Кути вимірювали у зеленому світлі на мікроскопі МБІ-6, за допомогою транспортира. Одночасно вимірювали довжину згину і вираховували швидкість росту як частку від ділення довжини ниток після згину на час, за який він утворився.

Для аналізу пластид протонему фарбували безпосередньо у чашках Петрі  $0.2\%$ -м розчином йоду у  $2.0\%$ -му водному розчині йодистого калю [6]. Розподіл і кількість зафарбованих і незафарбованих пластид аналізували на мікроскопі «Jenaval».

Для фарбування мембрально-зв'язаного кальцію використовували  $0.5 \text{ ммоль} \cdot \text{l}^{-1}$  водний розчин хлортетрацикіну (ХТЦ) [1]. Вміст  $\text{Ca}^{2+}$  визначали за інтенсивністю його флуоресценції на цитофлуориметрі ЛЮМАМ-РЗ. Люмінесценцію збуджували

синім світлом. Для цього зі світлового потоку лампи надвисокого тиску ДРШ-250 вирізали світлофільтром ФС-1 + СС-15 світло в межах  $\lambda = 380-420 \text{ нм}$ . Інтенсивність флуоресценції вимірювали, використовуючи світлофільтр  $\lambda_{\max} = 541 \pm 36 \text{ нм}$ .

Для внесення хелатора кальцію ЕГТА у середовище готували концентрований розчин, розводили його до робочих концентрацій у теплом агаризованому середовищі, яке розливали у чашки Петрі. Із середовища Кнopa вилучали солі, що містили іони кальцію. Для запобігання порушенням орієнтації столонів протонемна дернина росла на целофановій плівці, і разом з целофаном у темряві її переносили з однієї чашки на іншу та орієнтували перпендикулярно до вектора гравітації. Через 6 год гравістимуляції вимірювали довжину згину і величину кута.

Для дослідження фототропної реакції чашки з вертикально орієнтованою протонемою світили 6 год боковим червоним і синім світлом різної інтенсивності: від  $0.25$  до  $30 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Відразу після освітлення вимірювали кут згину і аналізували характер фототропної реакції: підраховували кількість столонів, які росли до світла, від світла, або не виявили жодної з цих реакцій і продовжували рости у тому ж напрямку, що й до освітлення.

Для аналізу взаємодії світла протонему почергово протягом 6 год освітлювали червоним і синім світлом і вимірювали кути згину. В одному досліді фільтри змінювали через 2 год, у другому — через 10 хв. Змінювали також послідовність червоного і синього світла: дослід починається з освітлення червоним чи синім світлом.

Досліди повторювали не менше трьох разів, у кожному з яких аналізували 100 окремих ниток. Для кожного варіанту вираховували середнє арифметичне значення і стандартну помилку [10].

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

У відповідь на бокове світло або переорієнтацію гравітропної протонеми з вертикального у горизонтальне положення відбувається поступовий або різкий (на червоному світлі) згин верхівкової клітини. Згин протонеми здійснюється за рахунок зміщення ростової зони. Протонемі *P. nutans*, як і деяким іншим видам мохів, властивий лише негативний гравітропізм [4]. Якщо гравістимулювану протонему полії пониклої освітити збоку, то фототропний ріст включається без затримки. Візуально реакція на бокове червоне світло проявляється швидко — через 15—20 хв. Реакція на синє світло дещо сповільнена у зв'язку з тим, що переорієнтація

росту здійснюється поступово, а не так різко, як на червоне світло, і виявляється через 20—30 хв. Відновлення негативного гравітропного росту також відбувається поступово і тому візуально цю реакцію можна зареєструвати, як і на синьому світлі, через 20—30 хв.

У зв'язку з різною реакцією протонеми *P. nutans* на синє і червоне світло ми провели порівняльні дослідження фототропізму двох видів: *P. nutans* і *C. purpureus*.

Першими були експерименти з боковим червоним та синім світлом низьких інтенсивностей: 0.25—0.5 мкмоль· $m^{-2}s^{-1}$ . Обидва види, *Pohlia* і *Ceratodon*, росли у напрямку до світла, тобто позитивно фототропно. Однак кут згину був малий — 10°. Для посилення фототропної реакції ми використаливищу інтенсивність, і тоді побачили, що протонема *C. purpureus* змінила напрям росту з позитивного на негативно фототропний, а протонема *P. nutans* на всіх інтенсивностях синього і червоного світла виявляла лише позитивний фото-

тропізм. Одночасно частина столонів не виявила жодної реакції (табл. 1).

З підвищенням інтенсивності світла, починаючи від 1.0—1.5 мкмоль· $m^{-2}s^{-1}$ , серед столонів протонеми *C. purpureus* спостерігалося значне збільшення ниток з негативним фототропним згином (рис. 1). Їхня кількість прямо корелювала з інтенсивністю освітлення. Значення кутів згину позитивного і негативного фототропізму не відрізнялися і були найвищими на червоному світлі (табл. 2).

На одностороннє червоне світло протонема *P. nutans* реагувала позитивно фототропно, а кут згину був значно більший, ніж на синьому світлі. Протонема *C. purpureus* виявила неоднозначну фототропну реакцію, і на низьких інтенсивностях столони росли до джерела світла, а на високих — від нього. Характер згину на світло був різним: на червоному світлі згин був різким, а на синьому — поступовим. Підвищення інтенсивності світла до 25 мкмоль· $m^{-2}s^{-1}$  стимулювало утворення фотозгину майже під прямим кутом на бокове червоне світло і під кутом 70°—80° — на синє [3—5]. Крім того, ростова реакція на червоне світло має ще один морфологічний вияв: утворюється випинання за рахунок переміщення ростової зони з апексу на бокову стінку протонеми [5].

У зв'язку з ефективністю червоного і синього світла для фототропізму протонеми, ми досліджували реакцію протонеми на почергове освітлення. Провели два різних досліди з періодичним освітленням гравістимульованої протонеми *P. nutans* і *C. purpureus* синім і червоним світлом. В одному

Таблиця 1. Типи можливих реакцій (П — позитивний, Н — негативний, 0 — відсутній) фототропізму згину *Pohlia nutans* і *Ceratodon purpureus* у залежності від інтенсивності світла; тривалість насвітлення 6 год

Інтенсивність світла, мкмоль· $m^{-2}s^{-1}$	Фототропізм <i>P. nutans</i>	Фототропізм <i>C. purpureus</i>
Червоне		
25.0—30.0	П 0	Н 0
7.0—14.0	П 0	Н 0
1.0—1.5	П 0	П 0
0.25—0.35	П 0	П 0
Синє		
25.0—30.0	П 0	Н 0
7.0—14.0	П 0	П Н 0
1.0—1.5	П 0	П Н 0
0.25—0.30	П 0	П 0

Таблиця 2. Вплив світла на величину кута  $\varphi$  фототропізму згину *Pohlia nutans* і *Ceratodon purpureus*, інтенсивність освітлення 11 мкмоль· $m^{-2}s^{-1}$ , тривалість 6 год

Світло	$\varphi$ , град		
	<i>P. nutans</i>		<i>C. purpureus</i>
	позитивний	позитивний	негативний
Біле	30.3±4.0	32.0±1.8	0
Червоне	46.6±2.1	50.1±4.2	53.7±4.9
Синє	21.1±1.1	20.6±1.9	21.3±1.7

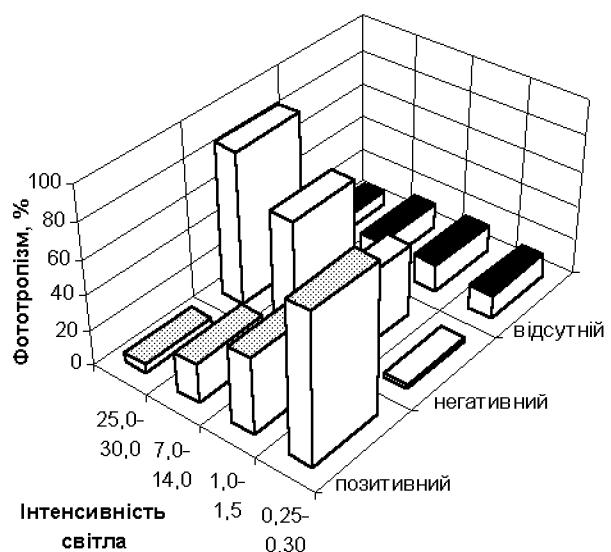


Рис. 1. Вплив різних інтенсивностей синього світла на фототропізм апікальних клітин протонеми *Ceratodon purpureus*

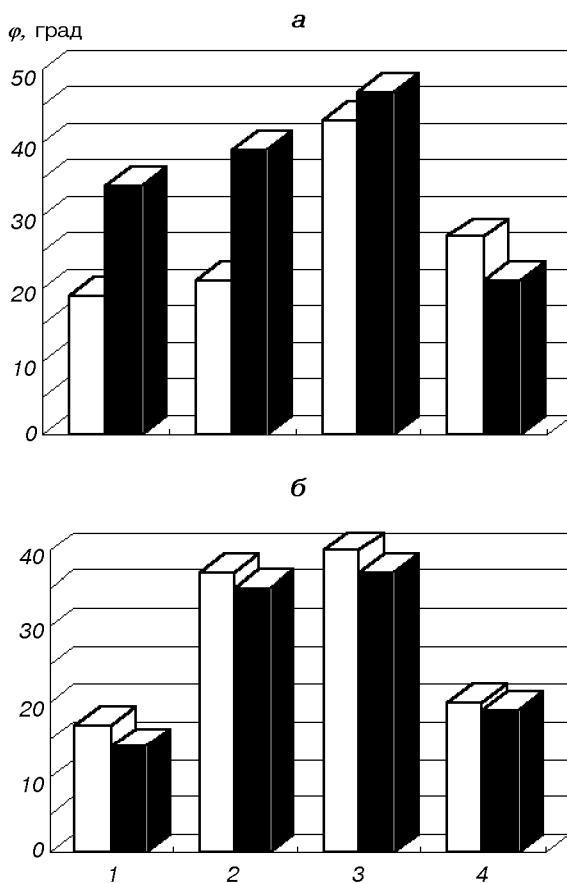


Рис. 2. Вплив чергування синього і червоного світла на величину фототропічного згину апікальних клітин протонеми *C. purpureus* (світлі стовпці) і *P. nutans* (чорні стовпці): 1 — синє + червоне, 2 — червоне + синє, 3 — червоне, 4 — синє. Чергування світла: а — через 2 год; б — через 10 хв. Загальна тривалість насвітлення 6 год

досліді рослини росли 2 год на червоному світлі, потім 2 год на синьому і знову 2 год на червоному. В іншому досліді початковим було синє, за ним червоне і знову синє. В обох випадках чергування не вплинуло на напрям згину. Однак загальна реакція була сильнішою, ніж при 6 год насвітленні синім світлом і слабшою, ніж при 6 год червоному світлі (рис. 2, а).

У третьому досліді чергування світла проводили не через 2 год, а через 10 хв протягом 6 год. У цьому випадку, якщо протонему освітлювали спочатку червоним, а потім синім світлом, то ефективність такої послідовності була вищою, ніж послідовності синє—червоне (рис. 2, б).

Вплив світла проявляється не тільки на фото-, але й на гравітропізмі протонеми. Так, якщо перенести протонему зі світла у темряву, то реакція на гравістимул проявляється зі значним запізненням. Найповільніше реагувала протонема *P. nutans*, що

Таблиця 3. Вплив 4-год насвітлення протонеми *Pohlia nutans* на відновлення гравітропного росту, інтенсивність насвітлення  $11 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  ( $t_{0.95} = 2.0$ )

Умови освітлення	Тривалість гравістимуляції, год	Кут згину, град	$t_{\text{експ}}^*$	Швидкість росту, $\mu\text{м}/\text{год}$
Контроль (темрява)	6	$15.8 \pm 1.1$	—	$13.8 \pm 0.9$
	24	$63.8 \pm 2.7$	—	$17.7 \pm 0.9$
	48	$79.7 \pm 3.1$	—	$21.4 \pm 1.1$
Червоне світло	6	$10.6 \pm 1.1$	3.3	$11.7 \pm 0.8$
	24	$16.8 \pm 1.2$	14.6	$16.6 \pm 1.3$
	48	$60.7 \pm 1.3$	5.2	$19.4 \pm 2.0$
Синє світло	6	$14.6 \pm 0.9$	0.8	$13.0 \pm 0.8$
	24	$63.0 \pm 2.4$	0.2	$16.4 \pm 1.4$
	48	$67.7 \pm 2.0$	3.1	$21.8 \pm 2.1$

\*  $t_{0.95}$  і  $t_{\text{експ}}$  — теоретичне і експериментальне значення статистики Стьюдента

виросла на червоному світлі. Синє світло також затримувало гравітропну реакцію. Виявилося, що навіть короткочасне (4 год) перебування протонеми *P. nutans* на світлі здатне затримати відновлення гравітропного росту. І в цьому випадку для відновлення негативного гравітропізму протонемі *P. nutans*, що росла 4 год на червоному світлі, потрібно було вдвічі більше часу, ніж тій, що виросла на синьому світлі (табл. 3). Тобто, якщо в протонемі зі синього світла кут негативного гравітропного згину досягав  $63.0 \pm 2.4^\circ$  вже за добу, як і в контролі ( $63.8 \pm 2.7^\circ$ ), то такої ж величини згин протонеми з червоного світла утворювався тільки через дві доби. Швидкість гравітропного росту поступово збільшувалась в усіх варіантах досліду і неістотно відрізнялася від контролю.

Час реалізації гравістимулу прямо корелював зі швидкістю седиментації амілопластів в апікальних клітинах протонеми мохів [35]. Седиментація амілопластів залежала від багатьох причин, пов'язаних зі станом цитоплазми, і особливо «густиною амілопластів», яку П. Пілет оцінює за кількістю амілопластів у клітині, їхнім розміром та вмістом в них крохмальних зерен [27, 28].

Дослідження кількості та розподілу амілопластів було першою спробою оцінити тимчасову втрату гравічувтиливості під дією світла. Як на червоному, так і на синьому світлі зменшувалася кількість зафарбованих  $\text{IK}_2\text{I}$  пластид, втрачалася їхня зональність, зменшувалася або й була відсутня вільна від амілопластів зона у верхівці апікальної клітини, і пластиди рівномірно розподілялися по всій довжині клітини. Під дією світла в клітинах збільшувалася загальна кількість пластид, при тому що кількість амілопластів (пластид, які фарбувалися  $\text{IK}_2\text{I}$ ) знижувалася (табл. 4). Значно виразніше це

Таблиця 4. Вплив 4-год насвітлення протонеми *Pohlia nutans* на загальну кількість пластид і амілопластів в апікальній клітині ( $t_{0.95} = 2.0$ )

Варіанти досліду	Кількість всіх пластид на клітину	Кількість амілопластів у гравістимульованій протонемі на клітину		
		0 год після насвітлення	24 год після насвітлення	48 год після насвітлення
Контроль (темрява)	42.1±2.3	40.1±2.1	40.7±2.4	41.0±1.7
Червоне світло	60.0±3.1 $t_{\text{експ}} = 4.6$	25.2±1.5 $t_{\text{експ}} = 5.7$	18.6±1.5 $t_{\text{експ}} = 7.8$	34.2±3.0 $t_{\text{експ}} = 2.0$
Синє світло	47.0±2.3 $t_{\text{експ}} = 1.5$	29.2±1.6 $t_{\text{експ}} = 4.1$	31.3±1.6 $t_{\text{експ}} = 3.3$	40.5±4.1 $t_{\text{експ}} = 0.1$

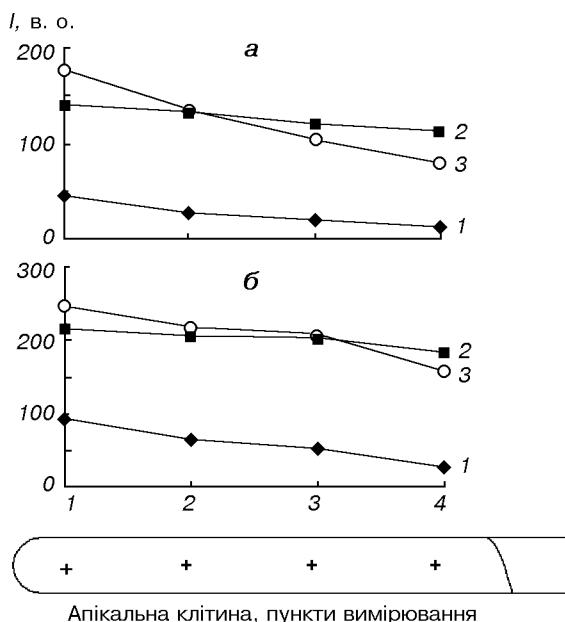


Рис. 3. Інтенсивність люмінесценції (у відносних одиницях) комплексу  $\text{Ca}^{2+} + \text{XTPC}$  в апікальних клітинах протонеми після 4 год дії світла: а — *Pohlia nutans*; б — *Ceratodon purpureus*. 1 — контроль, 2 — червоне світло, 3 — синє світло

виявлялося на червоному світлі, ніж на синьому ( $t_{\text{експ}} = 4.6$  для червоного світла і 1.5 для синього).

Пластиди були дрібніші ( $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$ ), тоді як у темряві вони значно більші ( $3.5 \times 3.0 \mu\text{m}$ ), зросла їх кількість, значно інтенсивнішою стала люмінесценція хлорофілу. Можна думати, що після освітлення відбувався процес трансформації амілопластів до функціонально активних хлоропластів. Коли після освітлення протонему знову перенесли у темряву для гравістимуляції, то до нагромадження крохмалю та відновлення асиметричного розподілу пластид клітини поверталися після червоного

Таблиця 5. Вплив ЕГТА на величину гравітропного згину протонеми *Pohlia nutans*, 6 год гравістимуляція ( $t_{0.95} = 2.0$ )

Концентрація ЕГТА, мкмоль/л	Гравітропний згин, град	$t_{\text{експ}}$	Довжина згину, мкм	Кількість проаналізованих столонів
0 (контроль)	17.4±0.4	—	128.8±9.2	100
50	16.6±0.8	0.9	131.4±5.8	100
100	10.0±0.6	10.3	111.8±4.2	80
500	7.5±0.5	15.5	74.8±4.4	80

го світла значно повільніше, ніж після синього. Вплив на пластиди синього світла такої ж інтенсивності був менший, і через дві доби кількість амілопластів в апікальних клітинах не відрізнялася від тієї кількості, що була до насвітлення ( $t_{\text{експ}} = 0.1$ ) (табл. 4).

Крім впливу на кількість та розмір амілопластів, червоне світло, як було показано раніше [34], виявляє істотний деполяризуючий вплив. У зв'язку з цим ми проаналізували вміст та локалізацію мембрально-зв'язаного кальцію під впливом світла. Зміна розподілу комплексу  $\text{Ca}^{2+} + \text{XTPC}$  виявилася вже після 4 год освітлення, причому більшим був вплив червоного світла, ніж синього у *P. nutans* і меншим у *C. purpureus* (рис. 3). Дія червоного світла призводила до значного збільшення рівня  $\text{Ca}^{2+}$  і повної втрати апікально-базального градієнта. Синє світло теж підвищувало вміст кальцію, однак менше послаблювало вираженість градієнта. Для всіх варіантів помилка середнього значення не перевищувала 7—10 %. Градієнт  $\text{Ca}^{2+}$  після перенесення освітленої протонеми у темряву відновлювався через 4—6 год, і швидкість росту протонеми у всіх варіантах була приблизно однаковою.

Застосування загального хелатування іонів кальцію за допомогою ЕГТА свідчить, що хелатування знижувало вміст  $\text{Ca}^{2+}$  в протонемі і пригнічувало гравітропну реакцію (табл. 5). При цьому, чим вищою була концентрація ЕГТА, тобто чим більша кількість іонів  $\text{Ca}^{2+}$  зв'язувалася хелатором, тим значнішим був вплив на гравітропізм і довжину згину, що підтверджує причетність кальцію до гравітропної реакції рослин.

Листяний мох *Pohlia nutans* як новий експериментальний вид у дослідженнях гравітропних реакцій використаний вперше. Досить обмежена кількість видів цієї групи рослин у дослідженнях гравіта фототропізму [19], а також взаємовпливів світла і гравітації у тропічних рухах протонеми [5] зумовили пошуки нових видів з децю відмінними реакціями [15]. Порівняно з таким потужним фактором як світло, сила земного тяжіння є набагато слабшим зовнішнім чинником, але у темряві зали-

шастється єдиним фактором, який детермінує просторову орієнтацію росту. Напрям і величина гравітаційного стимулу практично не змінювалися протягом всієї історії розвитку рослин. Тому рослини виробили механізми, за допомогою яких вони могли постійно коректувати положення свого тіла у просторі відносно вектора сили тяжіння.

*P. nutans* добре росте у темряві пучком паралельних столонів, орієнтованих вверх і реагує на гравітацію згином верхівки апікальної клітини. На світлі протонема *P. nutans*, як і інших видів мохів, росте плагіотропно по субстрату, однак за наявності градієнта освітленості виявляє орієнтований на світло фототропізм. В обох випадках векторність дії фактора визначила напрям росту, тобто два різних чинники, світло і гравітація, ініціювали однакову ростову реакцію — згин.

Вплив післядії світла на гравітропний згин *P. nutans* різний для червоного і синього світла. Очевидно, це можна пояснити внутрішньоклітинними змінами у градієнті і розподілі  $\text{Ca}^{2+}$ , перебудові амілохлоропластів, на які деструктивніше впливає червоне, ніж синє світло. Швидкість росту протонеми у темряві після дії червоного світла дещо знижувалася, тоді як синє світло навіть стимулювало ріст. Швидкість росту, проте, поступово збільшувалась в середньому за 8—10 год, як і в контролі, та досягала 19.4 мкм/год. Але ріст міг повернутися до норми за умови виникнення градієнта  $\text{Ca}^{2+}$ , оскільки існує явна синхронність між відновленням росту і появою градієнта  $\text{Ca}^{2+}$ . Відновлення росту, однак, не збігалося з відновленням гравітропізму. Така дія могла бути пов'язана з тим, що ріст корелює з наявністю градієнта кальцію, а гравітропізм — з якістю амілопластів, які зазнали більших змін на червоному світлі, ніж на синьому. Червоне світло призвело до утворення дрібних малокрохмальних пластид. Навіть у базальній частині апікальної клітини, де пластиди у темряві довгі веретеноподібні ( $4.0 \times 2.5$  мкм), вони стали круглими і дрібними ( $1.5 \times 1.5$  мкм). Ця зміна основного сенсорного апарату, очевидно, є причиною блокування червоним світлом гравінегативного росту. Такого впливу на  $\text{Ca}^{2+}$  і пластиди не спостерігали після дії синього світла, що й могло послабити його вплив на гравіреакцію.

Ростова реакція у обох видів на дію червоного і синього світла відрізняється типом згину: на червоне світло протонема реагує різким кутом, і час виявлення реакції менший, ніж на синє світло, згин на яке відбувається плавно і повільніше. До того ж на червоному світлі протонема утворює вип'ячення апікальної частини клітини — росток, що не спостерігається на синьому світлі [1, 2].

На тривале освітлення різними інтенсивностями червоного і синього світла *P. nutans* реагує позитивно фототропно, а *C. purpureus* лише на низьких інтенсивностях виявляє позитивний фототропізм, на високих інтенсивностях згини є негативно фототропні незалежно від довжини хвилі. Адсорбуючий світло receptor діє постійно, що передбачає утворення продукту цієї дії і його нагромадження у часовому проміжку між сприйняттям сигналу і реакцією. Якщо receptorом є фітохром, то продуктом його дії можуть бути спеціальні метаболіти, які утворилися внаслідок фітохром-регульованого білкового фосфорилювання, чи активація фітохромом протеїнкіназої активності, або інших реакцій фітохрому [19]. Так чи інакше, це є нові шляхи для дослідження механізму фітохром-залежного перетворення сигналу. Низькі інтенсивності синього світла зумовлюють позитивну реакцію, очевидно, включаючись у активацію через фітохромну пігментну систему. На високих інтенсивностях характер дії світла (червоного і синього) змінюється з ряду причин. Високі інтенсивності можуть інактиувати пігменти, або подіяти якимось іншим чином, але можуть теж включатися, як і на низьких інтенсивностях світла, через низькоенергетичну реверсійну систему червоного — далекого червоного світла. Проте у цьому випадку різко зростає вплив синього світла, очевидно, за участю інших receptorів, наприклад флавіно-протеїдного комплексу, або фікобілінів, переключаючи реакцію «слабкого» світла — позитивний фототропізм — на реакцію «сильного» світла — негативний фототропізм [7, 8].

Спектри дії позитивного і негативного фототропізму ідентичні, тому photoreceptorи повинні бути одні і ті ж. І пігменти, котрі адсорбують синє світло, і фітохром опосередковано є відповідальними за фототропні реакції протонеми мохів. Що стосується значення негативного фототропізму, то це може бути захисна функція, або адаптація, яка оптимізує ріст залежно від умов освітлення [20]. Той факт, що для фототропізму мохів ефективне червоне і синє світло, може свідчити про взаємодію цих пігментів. На таку думку наводять експерименти, в яких чергували червоне і синє світло. У дослідах з періодичним почерговим 2-год освітленням червоне — синє світло або навпаки не виявлено залежності між послідовністю світла і величиною кута згину. Зате коли інтервали між світлом скоротили до 10 хв і спочатку подали червоне світло, а потім синє, то це майже вдвічі посилило фототропну реакцію, порівняно з чергуванням, коли синє світло було перед червоним. Отже, послідовність червоне — синє світло для протонеми є

ефективнішою, ніж періодичність синє — червоне світло. Підсилення фототропної реакції синього світла в етользованих квіткових рослинах також відбувалося після попередньої експозиції їх на червоному світлі [9]. Так, для *Cassia fasciculata* показано, що фітохром є посередником складання листків, за участю  $\text{Ca}^{2+}$ -залежного процесу; рецептор синього світла контролює світло-залежне розгортання листків, яке порушується модуляторами  $\text{Ca}^{2+}$ -каналів. Реакція здійснюється за наявності  $\text{Ca}^{2+}$ , який може мобілізуватися із внутрішніх запасів [30]. Автори вважають, що в процесі цих двох типів рухів листків *C. fasciculata* іони  $\text{Ca}^{2+}$  мобілізуються з різних джерел: фітохром регулює вихід  $\text{Ca}^{2+}$  з апопласту, а синє світло індукує потік  $\text{Ca}^{2+}$  з вакуолі і ендоплазматичного ретикулуму.

Трансдукція світлового сигналу у фототропну реакцію протонеми у досліді з чергуванням червоного і синього світла, може бути зв'язана з тим, що червоне світло активує інтенсивність потоків кальцію із зовнішнього середовища, у той час як синє світло більше регулює внутрішній розподіл  $\text{Ca}^{2+}$  [18, 22, 25, 26]. Освітлення спочатку червоним світлом, а потім синім посилює зростання концентрації цитозольного  $\text{Ca}^{2+}$  як однієї з найшвидших реакцій на дію світла [11, 17, 21]. Швидке нагромадження  $\text{Ca}^{2+}$  активує ферментативні системи та метаболічні процеси. Одночасно з цим у клітинах включаються енергетично залежні помпи викачування кальцію з цитозолю, однак синє світло, подане через 10 хв після червоного, індукує вихід  $\text{Ca}^{2+}$  з вакуолі й ендоплазматичного ретикулуму і тим самим підтримує високий вміст  $\text{Ca}^{2+}$  у цитозолі. Під впливом початкового синього світла у клітинах в основному відбувається вихід  $\text{Ca}^{2+}$  з внутрішнього депо, а при наступному червоному світлі активується як вхід  $\text{Ca}^{2+}$  ззовні так і вихід його з клітин. Наявність двох факторів, які регулюють вміст внутрішньоклітинного  $\text{Ca}^{2+}$ , тобто активацію світлом входу  $\text{Ca}^{2+}$  у клітини і енергетично-залежний (за участю  $\text{Ca}^{2+}$ -АТФаз) вихід  $\text{Ca}^{2+}$  з клітин, обов'язково призводить до його змін, які переходят у коливний процес [11], і не виключено, що у цьому випадку виникають осциляції вмісту  $\text{Ca}^{2+}$ , а послідовності червоне — синє, синє — червоне можуть по-різному модифікувати амплітуду такого осциляційного процесу.

- Демків О. Т., Кардаш А. Р., Хоркавців Я. Д. Полярність растительних кліток, її становлення і переорієнтація // Рост і устойчивость растений / Под ред. Р. К. Салєєва, В. И. Кефели. — Новосибирск: Наука, 1989.—С. 29—45.
- Демків О. Т., Сытник К. М. Морфогенез архегоніат. — Київ: Наук. думка, 1985.—203 с.
- Демків О., Хоркавців Я., Кардаш О. Спільній американсь-

ко-український експеримент SPM на космічному кораблі «Columbia» // Екологічний збірник на пошану Андрія Сонзотовича Лазаренка: Праці наукового товариства імені Шевченка. — 1999.—III.—С. 13—18.

- Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Кардаш О. Р., Чабан Х. І. Гравітулова протонема моху — модельний об'єкт космічної біології // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3-4.—С. 34—39.
- Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Кардаш А. Р., Чабан Х. І. Взаємодієння світла і гравітації в ростових діяльностях протонем мхів // Фізіол. раст.—1997.—44, № 2.—С. 205—211.
- Дженсен У. Ботаніческая гистохимия. — М.: Мир, 1965.—377 с.
- Леопольд А. Рост и развитие растений / Под ред. И. И. Гунара. — М.: Мир, 1968.—404 с.
- Ліберберт Э. Фізіологія растеній / Под ред. В. И. Кефели. — М.: Мир, 1976.—580 с.
- Медведев С. С. Фізіологіческие основы полярности растений. — Санкт-Петербург: Изд-во Кольна, 1996.—157 с.
- Плохинський Н. А. Біометрія. — М.: Ізд-во МГУ, 1970.—367 с.
- Хоркавців Я. Д., Демків О. Т. Регуляція ростових процесів в ізольованих клітинних системах мохів // Фізіол. і біохим. культ. раст.—1993.—25, № 3 (144).—С. 284—289.
- Хоркавців Я. Д., Кардаш А. Р., Демків О. Т. Ростові процеси і взаємовідчуття кліток в ізольованих кліточних системах мха *Tetraphis pellucida* Hedw. // Фізіол. раст.—1989.—36, вып. 1.—С. 24—31.
- Bopp M. Developmental Physiology of Bryophytes // New Manual of Bryology / Ed. R. Schuster. — 1983.—Vol. 1.—P. 276—324.
- Bopp M., Atzorn R. Hormonal regulation of moss development // Naturwissenschaften.—1992.—79 (8).—P. 337—346.
- Chaban Ch.I., Volker K. D., Ripetsky R. T., et al. Gravitropism in caulonemata of the moss *Pottia intermedia* // J. of Bryology.—1998.—20.—P. 287—299.
- Demkiv O. T., Kordyum E. L., Khorkavtsiv Ya. D., et al. Gravity- and photostimuli in moss protonema growth movements // Adv. Space Res.—1998.—21, N 8/9.—P. 1191—1195.
- Eppel D. The initiation of development at fertilization // Cell Differentiation and Development.—1990.—29, N 1.—P. 1—12.
- Hartmann E. Influence of light on phototropic bending of moss protonemata of *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. // J. Hattori Bot. Lab.—1984.—N 55.—P. 87—98.
- Hartmann E., Weber M. Storage of the phytochrome-mediated phototropic stimulus of moss protonemal tip cells // Planta.—1988.—175, N 1.—P. 39—49.
- Hartmann E., Weber M. Photomodulation of protonema development // Bryophyte development: physiology and biochemistry / Ed. R. N. Chopra, S. C. Bhatia. — 1990.—P. 33—54.
- HauBer I., Herth W., Reiss H.-D. Calmodulin in tip-growing plant cells, visualized by fluorescing calmodulin-binding phenothiazines // Planta.—1984.—162, N 1.—P. 33—39.
- Hock B. Phytochrome // Progress in Botany.—1995.—56.—P. 201—235.
- Jenkins G. I., Courtice R. M., Cove D. J. Gravitropic responses of wild-type and mutant strains of the moss *Physcomitrella patens* // Plant, Cell and Environ.—1986.—9.—P. 637—644.
- Lobachevska O. V., Demkiv O. T., Ripetskyj R. T. Influence of gravity on spatial orientation and morphogenesis of moss sporophytes // Adv. Space Res.—1998.—21, N 8/9.—P. 1141—1144.
- Nick P., Furuya M. Buder revisited: cell and organ polarity during phototropism // Plant, Cell and Environment.—1996.—19.—P. 1179—1187.
- Nick P., Schafer E. Polarity induction versus phototropism in

- maize: Auxin cannot replace blue light // *Planta*.—1994.—**195**.—P. 61—69.
27. Pilet P. E., Greppin H., Bonzon M. Action de l'acide gibberellique sur la densité des amyloplastes racinaires // *C. r. Acad. Sci. Paris*.—1971.—**272**, N 13.—P. 1760—1763.
28. Pilet P. E., Nougarede A. Action de l'acide gibberellique sur la croissance et le geotropisme radiculaire // *C. r. Acad. Sci. Paris*.—1971.—**272**, N 3.—P. 418—422.
29. Ripetskyj R. T., Kit N. A., Chaban C. I. Gravity effects on the growth and development of moss secondary protonemata // *Adv. Space Res.*.—1998.—**21**, N 8/9.—P. 1135—1139.
30. Roblin G., Fleurat-Lessard P., Bonmort J. Effects of compounds affecting calcium channels on phytochrome- and blue pigment-mediated pulvinar movements of *Cassia fasciculata* // *Plant Physiol.*.—1989.—**90**, N 2.—P. 697—701.
31. Sack F. D. Plant Gravity Sensing // *Int. Rev. Cytol.*.—1991.—**127**.—P. 193—252.
32. Sack F. D. Plastids and gravitropic sensing // *Planta*.—1997.—**203**.—P. 63—68.
33. Schwuchow J. M., Kim D., Sack F. D. Caulonemal gravitropism and amyloplast sedimentation in the moss *Funaria* // *Can. J. Bot.*.—1995.—**73**.—P. 1029—1035.
34. Sytnik K. M., Demkiv O. T., Kordyum E. L., et al. Calcium gradient in plant cells with polarized growth in simulated microgravity // *Adv. Space Res.*.—1989.—**9**, N 11.—P. (11)41—(11)44.
35. Young J. C., Sack F. D. Time lapse analysis of gravitropism in *Ceratodon* protonemata // *Amer. J. Bot.*.—1992.—**79**.—P. 1348—1358.

---

**GRAVITROPIC RESPONSE IN PROTONEMATA  
OF THE MOSS *POHLIA NUTANS* (HEDW.) LINDB.  
AND ITS MODULATION BY LIGHT**

**O. Ya. Khorkavtsiv and O. T. Demkiv**

Comparative investigations of gravitropism were carried out in the protonemata of *Pohlia nutans* and well-studied moss *Ceratodon purpureus*. In darkness the protonemata of both species showed the negative gravitropism. Under uniform illumination from above they grew radially over the substrate surface, whereas unilateral illumination induced either positive or negative phototropic growth. In the *P. nutans* protonemata only positive phototropic curvature occurred, at the same time the *C. purpureus* protonemata were positively phototropic at low irradiation and negatively phototropic at high light. The protonemata of both moss species show different growth reactions in monochromatic light. The phototropic curvatures in blue light were smoother than in red one, which induced a very sharp curvature, with a nearly 90° bending angle. It was found that the phototropic response depends on the alternation of red and blue illumination. A ten-minute illumination appeared more effective in the red-blue than in the blue-red sequence. The effect of red and blue light signals is probably caused by changes in the cytosolic  $\text{Ca}^{2+}$  concentration, as the most rapid response to the light exposure. Gravitropism in the protonemata grown by light was found to depend on its quality, the gravitropic curvatures in the protonemata from the red light were weaker and they developed later than in the protonemata from the blue light.

УДК 629.7.081:578.824

## Влияние клиностатирования на вирус курчавой карликовости картофеля *in vitro* и *in vivo*

Л. Ф. Диденко<sup>1</sup>, Н. И. Пархоменко<sup>1</sup>, Л. А. Максименко<sup>1</sup>,  
Н. С. Дяченко<sup>1</sup>, Н. М. Зарицкий<sup>2</sup>, Ф. Е. Козар<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут мікробіології та вірусології НАНУ, Київ

<sup>2</sup>Інститут сільськогосподарської мікробіології УААН, Чернігів

Надійшла до редакції 29.06.99

Фіторабдовірус кучерявої карликовості картоплі, експонований *in vitro* в умовах клиностатування, зберігає інфекційність. Проте структурні вірусні білки, синтезовані в рослинах, інфікованих до'ї та після клиностатування, відрізняються своїм кількісним співвідношенням, характерним для нативного віруса.

### ВВЕДЕНИЕ

Предметом изучения является вирус курчавой карликовости картофеля (ВКК), выявленный впервые Ф. Е. Козаром с сотрудниками [1] в Украине в Черниговской области.

По морфологическим и биохимическим особенностям ВКК относится к семейству рабдовирусов, которое включает также вирус бешенства и вирус везикулярного стоматита. Структурная организация этих вирусов, содержащих минус-геномную РНК, обуславливает наличие ферментов: транскриптазы, полиA-полимеразы и протеинкиназы [4, 10, 12]. Изучение рабдовируса в условиях невесомости представляет особый интерес. Поскольку факторы космического полета могут изменить активность этих ферментов, то можно в будущем использовать этот вирус как источник уникальных ферментов.

Условия космического полета также могут нарушить или изменить целостность структурных компонентов фитовирусов, что в конечном итоге может повлиять на экспрессию их генома [3]. С другой

стороны, факторы космического полета приводят к изменению структурных особенностей растительной клетки, и при этом происходит изменение ее мембранных аппаратов [9]. Это, в свою очередь, может повлиять на синтез вирусспецифических молекул в процессе взаимодействия клетки с вирусами, так как их репродукция тесно связана с мембранными структурами клетки, более чувствительными к воздействию факторов космического полета [6]. Поэтому интересно было исследовать влияние факторов космического полета на инфекционные свойства вируса курчавой карликовости картофеля и особенности его репродукции в растениях, экспонированных в условиях микрогравитации.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Растения махорки (*Nicotiana rustica*) заражали со-ком больных растений. В ряде случаев растения инфицировали очищенным вирусом в концентрации 1 мг/мл. Для механического повреждения

листьев использовали «Celite Type 535» фирмы «Serva».

Выделение вируса осуществляли следующим образом. Листья махорки с ярко выраженным симптомами заболевания гомогенизировали в жидким азоте. К гомогенату добавляли буфер, содержащий 0.1 М глицин, 0.01 М  $MgCl_2$ , 0.01 М  $Na_2SO_3$ , pH 8.0. Затем фильтровали через нейлоновый фильтр. Фильтрат центрифугировали при 5000г в течение 10 мин. Из надосадочной жидкости вирус осаждали 7-м % полиэтиленгликолем (ПЭГ-6000) при наличии 0.15 М  $NaCl$ . Преципитированный ПЭГ-м вирус собирали центрифугированием при 10000г в течение 15 мин. Осадок ресуспендировали в буферном растворе pH 7.0, содержащем 0.1 М глицин, 0.01 М  $MgCl_2$ . Затем от ПЭГ освобождались центрифугированием при 10000г в течение 15 мин.

Чистоту вирусного препарата контролировали электронномикроскопическим методом. Для этого вирусную суспензию наносили на сеточки с формваровыми пленками-подложками, контрастировали 2 % ФВК pH 6.8 -7.0 и исследовали в электронном микроскопе ЭМБ-100.

Диагностическую сыворотку получали путем иммунизации кроликов очищенным ВККК в концентрации 1 мг/мл с применением адьюванта Фрейнда. Вирус в соке инфицированных растений выявляли методом двойной иммунодиффузии в геле [11]. Для детекции вирусов по Оухтерлони во всех случаях использовали одинаковые навески листьев.

Молекулярную массу вирусных белков определяли методом электрофореза в полиакриламидном геле в денатурирующих условиях по Лаэммли [7].

Вирус экспонировали в условиях микрографитации, имитируемой посредством клиностатирования, следующим образом. Вирусную суспензию в концентрации 1 мг/мл помещали в пеницилличиновые флаконы, которые крепили на пенопластовую платформу, расположенную в металлическом стакане. Клиностатирование проводили в холодильной камере при +4 °С на клиностате, вращающемся в горизонтальной плоскости со скоростью 2 об/мин. Клиностат изготовлен НПО «Респиратор» (Донецк).

Вирусный препарат клиностатировали в течение 7, 14, 21 и 28 сут. В качестве контроля использовали вирусный препарат, инкубированный в тех же условиях, но без клиностатирования. Для заражения опытным и контрольным вирусным препаратом использовали 4-недельные растения *N. rustica*.

Для клиностатирования использовали 4-недельные растения *N. rustica*. С этой целью предварительно выращенные в теплице одновозрастные растения высаживали в стерильную почву в торфяных

горшках, которые в свою очередь помещали в металлические цилиндры. Нижним основанием цилиндры крепили к клиностату, а верхний слой почвы укрепляли пенопластовым диском с отверстием для стебля. На боковой поверхности цилиндра находились 3 мм в диаметре отверстия, предназначенные для полива растений. Полив осуществлялся с помощью шприца. Клиностатирование растений проводили при температуре +23 °С при дневном освещении. После окончания клиностатирования растения выращивали в теплице до проявления максимально выраженной патологии растений, которая проявлялась в отставании роста растений, измельчении и скручивании листьев. После этого из этих растений выделяли вирус и исследовали его структурные белки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Объектом исследований является вирус курчавой карликовости картофеля, изолированный из растений *Nicotiana rustica*, для хранения которого использовали жидкий азот. По данным электронной микроскопии вирусный препарат не содержит примеси других вирусных частиц (рис. 1).

Установлено, что инфекционные свойства ВККК сохраняются в условиях клиностатирования в течение всего исследованного периода (28 сут). При проведении серологических исследований было установлено, что растения, инфицированные клиностатированным и контрольным вирусом, давали

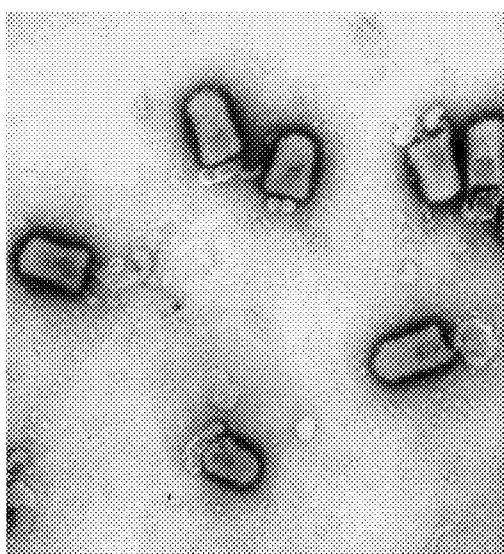


Рис. 1. Электронная микрофотография очищенного вируса курчавой карликовости картофеля

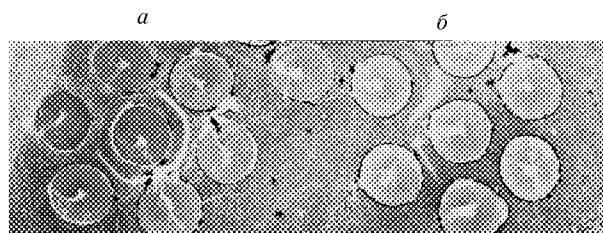


Рис. 2. Реакция двойной иммунодиффузии по Оухтерлони: *а* — сок растений, инфицированных вирусом после клиностатирования; *б* — сок растений, инфицированных вирусом перед началом клиностатирования

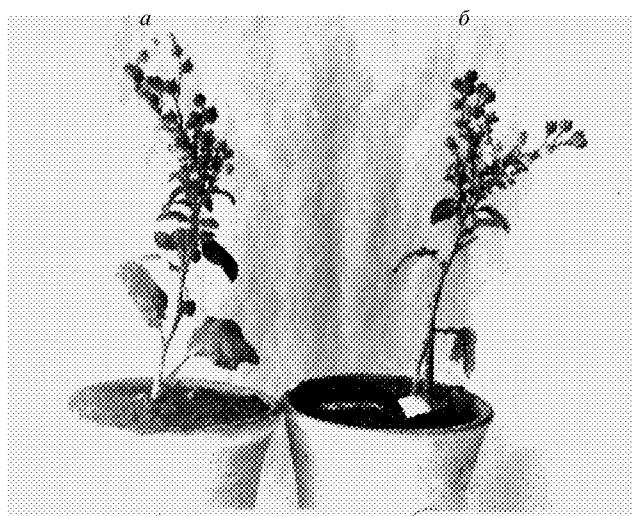


Рис. 3. Растения махорки: *а* — инфицированное клиностатированным вирусом; *б* — инфицированное контрольным вирусом

положительную реакцию с антисывороткой, полученной к нативному вирусу (рис. 2), что свидетельствует о накоплении вируса в растениях. При этом на весь период в разные сроки растения, пораженные клиностатированным и контрольным вирусом, в росте и развитии, а также по признакам заболевания мало отличались (рис. 3).

Другая закономерность наблюдалась при инфицировании клиностатированных растений. В случае инфицирования вирусом растений в начале клиностатирования наблюдался замедленный рост растений в отличие от растений, инфицированных вирусом после 3-недельного клиностатирования и впоследствии развивающихся в обычных условиях (рис. 4). По-видимому, отставание роста растений, инфицированных ВККК в начале клиностатирования, прежде всего обусловлено вирусной инфекцией, вызывающей карликовость растений. Протяженность вирусного патогенеза в растениях махорки в течении трех недель достаточна для проявле-

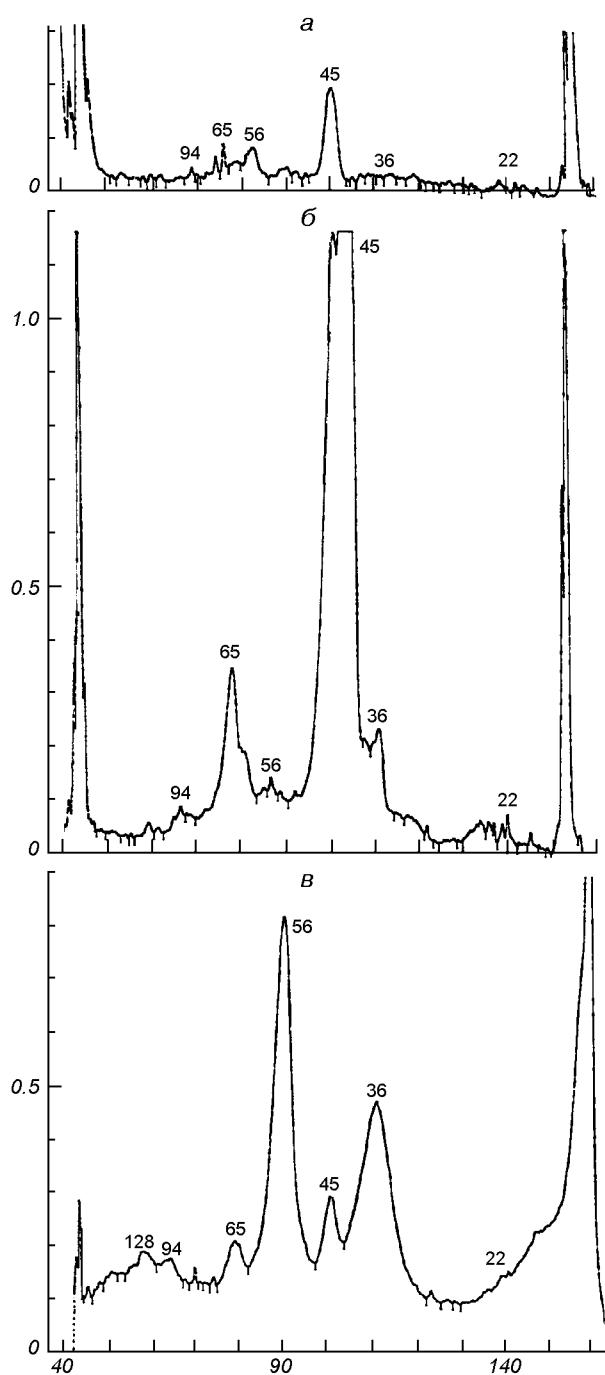


Рис. 4. Клиностатированные растения махорки: *а* — здоровое, не клиностатированное; *б* — инфицированное вирусом после окончания клиностатирования; *в* — инфицированное вирусом перед клиностатированием

ния этой карликовости визуально. Хотя нельзя отрицать и возможное влияние клиностатирования на развитие уже инфицированных растений.

В другом варианте опыта растения, инфицированные через три недели после клиностатирования, отличались по своему развитию, по-видимому, потому, что инфицирование растений было смешено по времени на три недели. Поскольку в обоих случаях клиностатирование растений проводили одновременно, а только инфицирование растений осуществляли до и после клиностатирования, поэтому отставание в росте и развитии растений одинаково относительно к другим, возможно, вызвано вирусной инфекцией. Микроскопический контроль не показал инфицирования растений другими микробами. Кроме того, здоровое клиностатированное растение от неклиностатированного по своему развитию почти не отличалось.

С другой стороны, нельзя исключить, что растение, инфицированное после клиностатирования, а затем перенесенное в обычные условия, возможно, использует репарационные возможности, способные восстанавливать некоторые функциональные изменения, вызванные микрогравитацией. Однако в условиях микрогравитации возможны физиологические и структурные изменения растительной клетки, обеспечивающие восприимчивость растений к вирусам. Свидетельством этому служит то, что инфицированные клиностатированные растения содержали меньше вируса по сравнению с растениями, которые заражали уже после клиностатирова-



ния (рис. 5). Можно предположить, что репродукция вируса в растениях, экспонированных в условиях микрогравитации, также претерпевает неко-

торые изменения. Поэтому было важно выделить из этих растений вирус и изучить возможность изменения его компонентов. С этой точки зрения заслуживают внимания вирусные структурные белки, ответственные за экспрессию минус-геномной РНК ВККК.

Согласно с обозначением, принятым в работе [10], белки классифицированы следующим образом: G (65—90 кДа) — гликопротеид, присутствующий на поверхности вириона; M (20—30 кДа) — мембранный белок, заполняющий пространство между нуклеокапсидом и липопротеидной оболочкой, N (47—62 кДа) — структурный белок, образующий чехол, в который упакована геномная РНК; NS (40—50 кДа) и L (150—190 кДа) — нуклеокапсидные белки, обладающие транскриптазной активностью.

Электрофоретический анализ белков вирусов, выделенных из инфицированных непосредственно перед клиностатированием растений, показал, что эти растения содержали меньше вирусных белков, чем растения, инфицированные после 3-недельного клиностатирования (рис. 5), что согласуется с результатами серологического анализа (рис. 3).

В результате проведенных исследований отмечается минимальное содержание мембранных белков 22 и 36 кДа в составе ВККК, изолированного из растений, инфицированных до и после клиностатирования в сравнении с их содержанием в вирионе, изолированном из контрольных растений. Кроме того, в обоих вариантах наблюдается увеличенное содержание белка 45 кДа, который по молекулярной массе соответствует нуклеокапсидному белку NS. Однако такое содержание белка NS, обладающего транскриптазной активностью, маловероятно, поскольку в рабдовирусах этот белок, как правило, обнаруживается в минимальных количествах. В нашем случае этот мажорный белок 45 кДа, возможно, представляет собой суммарные белки — белок NS и продукты деградации или неоконченного синтеза другого нуклеокапсидного белка N — 56 кДа. Белок 65 кДа скорее всего является гликопротеидом G, увеличенное содержание которого отмечается в растениях, инфицированных после клиностатирования.

Согласно работе [6] факторы космического полета в ряде случаев приводят к изменению мембранных аппаратов растительной клетки. В этой связи интересно отметить, что белок G рабдовирусов человека и растений синтезируется на мембраносвязанных полисомах [5, 8], являющихся неотъемлемой частью мембранных аппаратов клетки. В нашем случае изменение мембранных аппаратов клеток растений *N. rustica* в условиях клиностати-

рования также возможно, поскольку наблюдается изменение количества белка G в вирусном препарате из клиностатированных растений по сравнению с контрольным вирусом.

Таким образом, в растениях, экспонированных в условиях микрогравитации, нарушается количественное соотношение структурных белков ВККК, что играет определенную роль в морфогенезе и некоторых других особенностях синтеза вирусспецифических макромолекул. Вероятно, это обусловлено нарушением мембранных структур клетки.

1. Козар Ф. Е., Курбала М. Л., Щербина Н. В. и др. Курчавая карликовость — вирусная болезнь картофеля, вызванная бацилловидным вирусом из группы рабдовирусов // Вирусные болезни сельскохозяйственных культур. — М., 1980.— С. 69—76.
2. Максименко Л. А., Краев В. Г., Диденко Л. Ф. и др. Исследование РНК-зависимой РНК-полимеразы вируса курчавой карликовости картофеля // Микроб. журн.— 1994.—56, № 5.—С. 90.
3. Chang D., Paulsen A., Johnson T. C., et al. Virus protein assembly in microgravity // Adv. Space Res.—1993.—13.— P. 251—257.
4. Didenko L. F., Parkhomenko N. I., Maksimenko L. A., et al. Physico-chemical and functional peculiarity of phytorhabdovirus curly potato dwarf virus (CPDV) // II International conference «Bioresources and viruses». — Kyiv, 1998.—P. 120.
5. Grubman M. J., Ehrenfeld E., Summers D. F. In vitro synthesis of proteins by membrane-bound polyribosomes from vesicular stomatitis virus infected Hela-cells // J. Virol.—1974.—14.— P. 560—571.
6. Kordyum E. L. Effects of altered gravity on plant cell processes: results of recent space and clinostatic experiments // Adv.

Space Res.—1994.—14, N 8.—P. 77—85.

7. Laemmli V. K. Cleavage of Structural proteins during the assembly o the head of Bacteriophage T4 // Nature.—1970.— 227, N 5259.—P. 620—685.
8. Milner J. J., Jackson A. O. Sequence complementarity of Sonchus yellow net virus RNA with RNA from polysomes of infected tobacco // Virology.—1979.—97, N 1.—P. 90—99.
9. Moore R. How effectively does a clinostat mimic the ultrastructural efects of microgravity on plant cells? // Ann. Bot. (USA).—1990.—65, N 2.—P. 213—216.
10. Murphy F. A., Fauquet C. M., Bishop H. L., et al. Virus Taxonomy Classification and Nomenclature of Viruses Sixth Report of the International Committee on Taxonomy of Viruses (Virology Division International Union of Microbiological Societies) — Springer Verlag Wien New York Archives of Virology, 1995 Supplement 10, P. 275—288.
11. Ouchterlony O. In handbook immunodiffusion and immuno-electrophoresis // Ann. Arbor. Michigan. Ann. Arbor. Science Publishers.—1968.—P. 37.
12. Wagner R. R. Reproduction of rhabdovirus // In comprehensive virology / Eds H. Fraenkel-Conrat, R. R. Wagner. — New York: Plenum Press, 1975.—P. 1—93.

#### INFLUENCE OF CLINOSTATING ON THE CURLY POTATO DWARF VIRUS IN VITRO AND IN VIVO

L. F. Didenko, N. I. Parkhomenko, L. A. Maksimenko, N. S. Dyachenko, N. M. Zaritskiy, and F. E. Kozar

It is shown that the phytorhabdovirus the curly potato dwarf virus (CPDV) retains its infection properties under the clinostating conditions. However, the structural virus proteins synthesized in plants infected before and after clinostating differ by their quantity ratio characteristic for the native virus.