

УДК 621.372.542

Імітаційне моделювання, методи теорії хаосу та фракталів в космічних дослідженнях

Б. В. Кисіль

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

Надійшла до редакції 13.04.98.

Розглядаються підходи, математичні моделі, алгоритми синтезу зображень, завад та їх взаємодія. Отримано «реальні» зашумлені модельні зображення та шуми (спекл-шум, тепловий шум, турбулентність атмосфери), які з'являються в задачах дистанційного зондування земної поверхні та інших космічних об'єктів. Представлено графічне відображення складних об'єктів та фізичних процесів, які виникають в задачах космічних досліджень. Розроблені алгоритми базуються на імітаційних моделях, теорії хаосу та фрактальних зображеннях.

Дистанційне зондування земної поверхні є однією з важливих задач космічних досліджень. В останні роки методи, засоби та системи дистанційного зондування знаходять широке та різностороннє застосування в дослідженнях природних ресурсів, екології, військовій сфері, дослідженнях космічних об'єктів. Провідні країни світу та космічні агентства приділяють цим проблемам велику увагу.

Важливе місце в задачах зондування займають радіолокаційні системи з синтезованою апертурою (РСА), розміщені на авіаційних та космічних носіях. Такі РСА широко використовуються в геології (розвідка корисних копалин, в тому числі морських газових та нафтових родовищ), екології (контроль оточуючого середовища, виявлення забруднень), сільському господарстві (землекористання, прогнозування урожайності), тематичній картографії (визначення складу та стану рослинності, класифікація покриття земної поверхні та населених областей), океанології, гідрології і багатьох інших галузях людської діяльності [4].

Основним джерелом інформації при вирішенні задач дистанційного зондування засобами РСА є радіолокаційні зображення. Однією з істотних особливостей таких зображень є наявність шуму

(завад). Причини виникнення шуму на зображенні можуть бути різними, і важливим є вивчення цих причин, встановлення природи шуму та розробка методів і засобів його подавлення.

Інтерес до моделювання зображень викликаний бажанням отримувати засобами комп'ютерного моделювання: а) «реальні» зашумлені та «підпсовані» зображення, які формуються технічними засобами реєстрації, б) зображення складних фізичних об'єктів та процесів в просторово-часових координатах, котрі важко, а часом і неможливо, отримати технічними засобами реєстрації. Перша причина зумовлена в більшості випадків практичними задачами обробки та розпізнавання зображень (дистанційне зондування, гідро-, радіо-, лазерна локація, технічне бачення і т. д.), сформованих зображень технічними системами реєстрації. Такі дослідження дають змогу, знаючи природу формування зображення, синтезувати оптимальні фільтри та алгоритми відновлення зображень для отримання «ідеальних» зображень [5]. Друга причина має на меті комплексне вивчення та дослідження механізмів формування зображень з подальшим переходом від інформаційних механізмів до фізичних та їх подальшої інтерпретації.

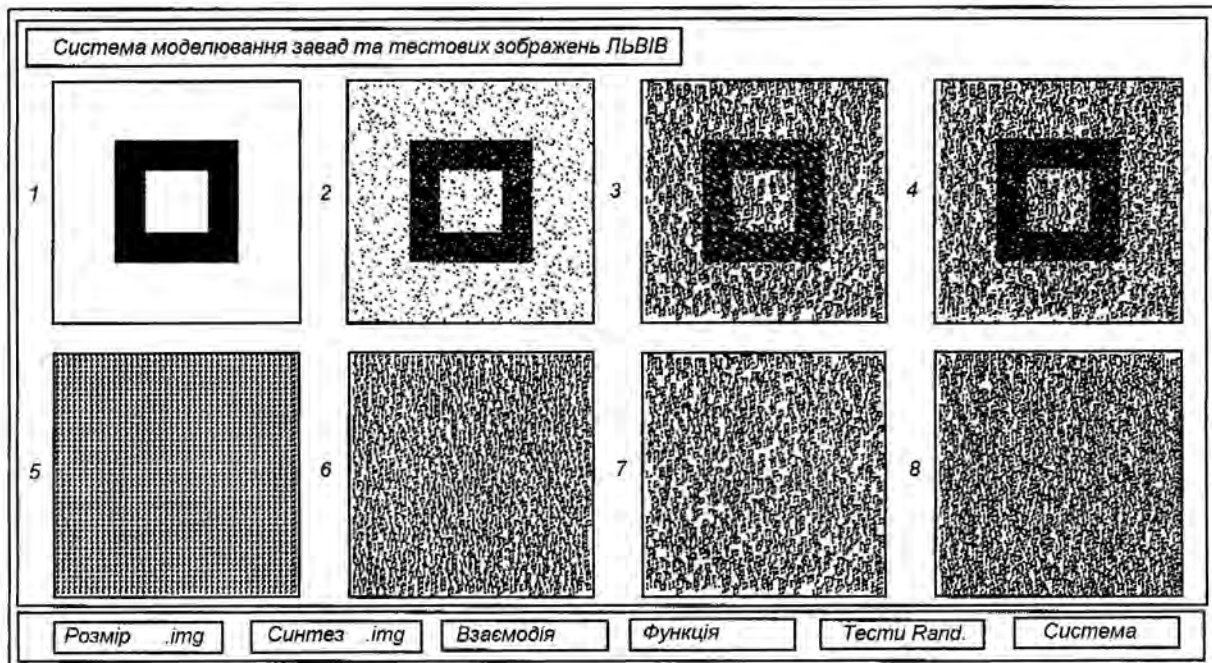


Рис. 1. Моделювання зображень, завад, текстур та їх взаємодії

Зображення в процесі їх формування звичайно вироджуються випадковими завадами або шумами. При синтезі алгоритмів, орієнтованих на роботу з реальними об'єктами (зображеннями), необхідно враховувати виродження, які вносяться як системою формування зображень (різні пристрої прийому зображень), так і системою, яка породжує зображення. Найбільш повний опис таких вироджень – це модель взаємодії завади з зображенням та модель самої завади [6]. Якщо виходити із статистичної моделі завади, то її статистичні характеристики часто можна визначити на основі структури та характеристик відповідних систем формування зображень. Наприклад, шум зернистості фотоплівки в фотографічних системах визначається її типом та режимом фотохімічної обробки, шум в радіотелевізійних системах – потужністю радіосигналу в каналі зв'язку, в голографічних системах – роздільною здатністю приймального пристрою.

Найбільш розповсюдженим видом завад на зображеннях є адитивний, статистично незалежний від відсигналу флуктуаційний шум.

Модель адитивного шуму використовується тоді, коли сигнал на виході системи або якому-небудь проміжному етапі його перетворення може розглядатися як сума корисного сигналу та деякого випадкового сигналу (шуму). Так, наприклад, описується дія зернистої фотоплівки, флуктуаційний шум в радіотехнічних системах і т. п.

Імпульсний шум характерний для систем передачі зображень радіоканалами з використанням нелінійних видів модуляції сигналу (частотної модуляції, часово-імпульсної модуляції), а також для цифрових систем передачі та зберігання зображень.

При мультиплікативній моделі корисний сигнал помножується на випадковий сигнал. Такою моделлю характеризуються дії шуму фотоелектронних помножувачів, шуму дифузності в когерентно-оптичних та інших голографічних системах.

Модель спекла охоплює статистичний опис сукупності пікселів, які створюють деяке радіолокаційне зображення (РЛЗ), а також вид взаємодії шуму і сигналу від об'єкта спостереження [1].

Статистична модель «класичного» спекла базується на представленні елемента роздільної здатності радіолокаційної станції з синтезованою апертурою (РСА) у вигляді сукупності великої кількості випадкових незалежних елементарних точкових відбивачів з приблизно однаковими розсіювальними властивостями і рівномірно розташованими фазами відбитого сигналу. В цьому випадку статистика спекла задовольняє добре відомий релеевський (а для потужності – від'ємний експоненційний) закон розподілу [2]. На рис. 1 наведені приклади зашумлених зображень (2–4).

В багатьох випадках на більшій частині зображень природних об'єктів (ландшафт, ліси, поля) відсутні суттєві деталі. В цих областях зображення

часто можна характеризувати до деякої міри регулярним (можливо, випадковим) повторенням певної структури, розмір якої набагато менший від розміру самого зображення. Зображення таких областей називають текстурями.

При аналізі зображень часто використовують синтез текстур. З одного боку, використовують синтезовані текстури для заміни вироджених областей зображення, з іншого — для визначення текстурних ознак зображення — спектральні, статистичні та просторові характеристики природних об'єктів (рослинний покрив поверхні).

Основний підхід до синтезу текстур полягає в створенні деякого базового елемента текстури (шаблону) і повторенні цього елемента по всій площині зображення. Повторення шаблону можна здійснювати регулярно (регулярна текстура) та будь-яким іншим, включаючи і випадковий спосіб. Коли виникає часткове (повне) накладання шаблонів на певній ділянці зображення, задають функцію взаємодії [3]. Приклади синтезованих текстур зображені на рис. 1 (5 — регулярна текстура, 6, 7 — випадково зміщені шаблони на один і три піксели відповідно, 8 — випадкова текстура, тобто шаблони за рівномірним законом покривають поле зображення).

Досить недавно було виявлено, що деякі комп'ютерні системи моделювання фізичних процесів, а також чисто математичних об'єктів ведуть до формування зображень, дуже близьких до реальних зображень природних об'єктів і процесів. Самі природні об'єкти і процеси можуть мати різну фізичну суть, породжуватись різними фізичними процесами, але зображення, які вони породжують, часто мають однакову інформаційну природу і можуть породжуватись однією комп'ютерною моделлю. Такі зображення, як правило, мають складну і тонку структуру (берегова лінія моря, дельта рік, гірський ландшафт, коралові покриття, текстури земної поверхні, вкритої рослинністю, зображення нейроструктури мозку, лімфатичної та кровоносної системи живого організму, процеси дифузії та осадження металів і т. п.).

Неабиякий інтерес до моделювання таких зображень викликає ще й тим, що механізми, покладені в основу моделювання, можуть дати можливість вивчати та розкривати фізичні механізми самих природних процесів, які породжують зображення (еволюція природних утворень — земної поверхні, внутрішніх пластів Землі, рослинного та тваринного світу; хімічних та біохімічних структур; кристалів).

З точки зору інформаційних технологій таке моделювання дасть змогу комплексно описувати та

стискати великі обсяги інформації, які несуть такі зображення для задач ефективного зберігання та передачі даних.

І останнє, такі дослідження і практичні реалізації та експлуатації комп'ютерних моделей дають можливість глибше проникнути сучасним інформаційним технологіям в нові галузі знань (природоохорона, екологія, медицина, геологія) та суттєво збагатити і відкрити нові природні та суспільні технології.

Донедавна вважалося, що в принципі можна досягнути повного передбачення. Для цього необхідно тільки зібрати і обробити достатню кількість інформації.

Таку точку зору різко змінило відкриття, яке показало, що прості детерміновані системи з малим числом складових компонентів можуть породжувати випадкову поведінку. Така випадкова поведінка має принциповий характер, її неможливо позбутися, збираючи більше інформації. Породженому таким чином випадковості прийнято називати хаосом. Хаос може мати детерміністичний характер, в ньому є порядок, а в основі хаотичної поведінки лежать геометричні структури, які створюють випадковість.

Відкриття хаосу викликало до життя новий метод наукового моделювання. З одного боку, він ввів нові принципові обмеження на можливість прогнозування, з іншого — закладений в хаосі детермінізм показав, що багато випадкових явищ більш передбачувані, ніж вважалося раніше. Хаос дозволяє знаходити порядок в таких різних системах, як атмосфера, хімічні реакції, серцево-судинна система, наплення матеріалів, ландшафт і т. д.

Поняття хаосу відноситься до теорії динамічних нелінійних систем. Ці системи включають поняття стану та динаміки (правила, що описують еволюцію чи розвиток, функціонування системи в часі). Динаміку описують в просторі станів — фазовому просторі, в якому координатами є компоненти стану системи. Таким чином, фазовий простір дає можливість описувати динамічні системи, представляючи їх поведінку в геометричній формі. Відображення певних стабільних поведінок системи на фазовий простір називають атрactorами, і для детермінованих нехаотичних систем в геометричній формі вони представляються нерухомими точками, графічними точками, граничними циклами та торами. Для систем з хаотичною поведінкою атрactorи мають складну геометричну структуру, в багатьох випадках близьку до фрактальної. Виявлено досить прості системи з трьома ступенями вільності, які поводять себе чисто випадково і мають хао-

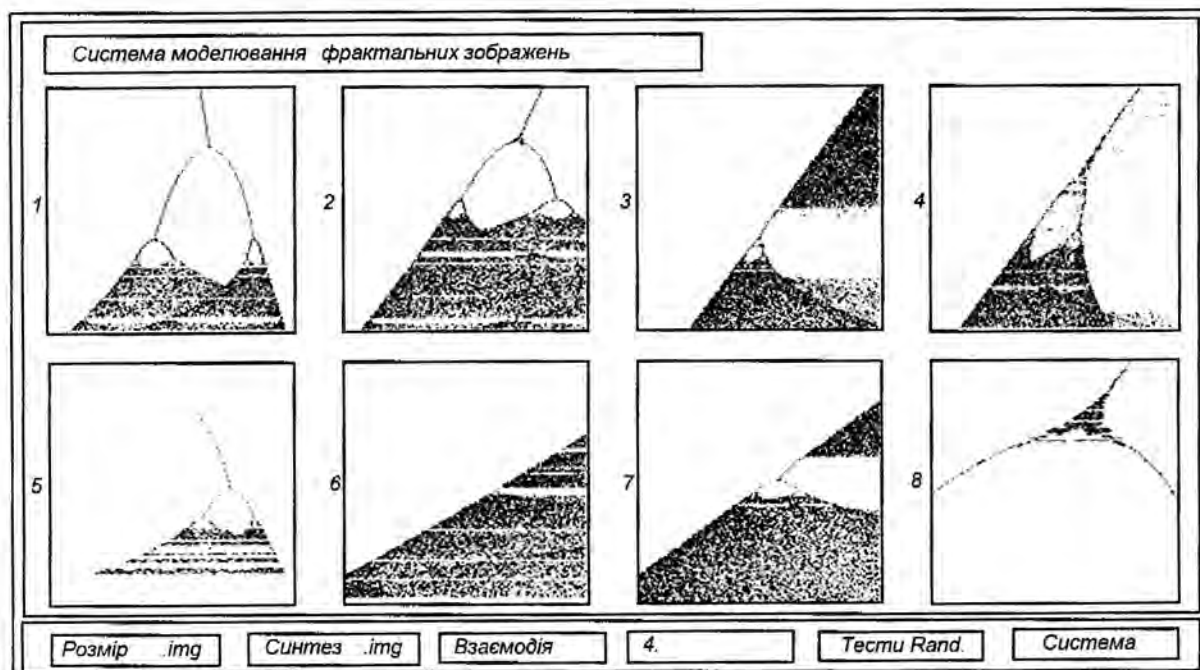


Рис. 2. Моделювання атракторів нелінійних динамічних систем

тичний характер. Основний механізм, що викликає хаотичну поведінку в таких системах, полягає в тому, що мікроскопічні збурення накопичуються і впливають на макроскопічну поведінку.

Представлення поведінки динамічної системи у фазовому просторі графічним об'єктом дозволяє використовувати сучасний апарат фрактальної геометрії для вивчення тонкої структури як самої системи, так і її поведінки. Це також дає можливість по-новому трактувати елементи випадковості (хаосу) в поведінці системи, виробляти нові нестандартні методи прогнозу та оцінки стану і поведінки системи.

Основою для моделювання зображень, що представляють аттрактори таких систем, є ітераційний процес $\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{R})$, де \mathbf{R} — параметр системи, \mathbf{X} та \mathbf{R} — векторні величини і \mathbf{F} — відповідно векторна функція. На рис. 2 наведені приклади моделювання стабільних станів для скалярних функцій $x = rx(1 - x)$ та $x = rx(1 - x^2)$: у вікнах з номерами 1 та 5 показані початкові зображення, а у вікнах 2–4 та 6–8 зображення є збільшенням вибраних фрагментів приблизно у 10 разів (наступний фрагмент відносно попереднього). По горизонталі відкладено значення $0 \leq x \leq 1$, а по вертикалі — значення параметра $2 \leq r \leq 4$.

Коротко зупинимося на інших моделях, які реалізовані у вигляді програмних систем і знайшли своє практичне використання у розв'язанні при-

кладних задач. Основні з них: моделювання взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками; моделі агрегації, обмеженої дифузією, а також моделі, засновані на генерації фрактальних зображень.

Найпростішою моделлю взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками можна вважати двомірну ґратку, у вузлах якої є елементи, що мають чотири (зліва, справа, знизу, зверху) або вісім (включені діагоналі) сусідів, пов'язаних з ними певною функціональною залежністю і змінюють свій стан в залежності від стану сусідів. В обмежених полях, на відміну від тора, на границях задають пограничні умови. Процес моделювання полягає в генерації повного розподілу станів елементів поля, введення ефекту (ісоднорідності) локальних зв'язків, функції зміни стану та «спрацьовування» елементів поля, тобто дискретної зміни станів елементів (прикладу моделювання показані на рис. 3).

В цьому прикладі досліджена наступна функція взаємодії: якщо в околі елемента P_{ij} (в даному випадку околі — це елементи $P_{i-1,j}$, $P_{i+1,j}$, $P_{i,j-1}$ та $P_{i,j+1}$) є елемент із значенням $P_{i,j+1}$ (стан елементів — цілі числа), тоді значення P_{ij} збільшується на одиницю. Рецепторне поле реалізоване у вигляді тора, і функція взаємодії не є рекурсивною відносно рецепторного поля, тобто околі будь-якого елемента не враховує зміни, які вже відбулися в ньому

на даній ітерації. Ця функція рекурсивна відносно ітерації.

Такі моделі взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі з локальними однорідними зв'язками можуть використовуватися для дослідження процесів теплопередачі, поширення напруженості в матеріалах, станів рідин та газів при космічних орбітальних експериментах.

Іншою різновидністю подібних моделей є моделі агрегації, обмеженої дифузією. Клас таких моделей базується на принципах броунівського руху і може бути ефективно використаний для моделювання росту кристалів, процесів нанішення металів, електролізу, утворення сумішей, розвитку органічних популяцій, які проходять в умовах невагомості.

Розглянемо деякі підходи до синтезу зображень агрегації, обмеженої дифузією, що базуються на моделях випадкового руху (одним із видів такого руху є броунівський рух). Самі зображення агрегації та процес їх генерації будемо розглядати на матриці цілих чисел

$$M = \{m_{i,j}\}, \quad i = 1, \dots, n_1, \quad j = 1, \dots, n_2.$$

Нехай задано три пемусті множини пар індексів:

$$A_0 = \{a_k\} = \{(i, j)\}, \quad C = \{c_q\} = \{(i, j)\},$$

$$G = \{g_r\} = \{(i, j)\}$$

$$k = 1, \dots, K, \quad q = 1, \dots, Q, \quad r = 1, \dots, R.$$

Множину A_0 будемо називати початковим станом (центром) агрегації. Нехай $m_{i,j}$, де $(i, j) \in A_0$, приймають певні цілі значення.

На множині C задана імовірнісна міра P_c . Множину G назвемо границею агрегації.

З будь-якою парою $\{i, j\}$ індексів матриці M будемо пов'язувати множину T пар індексів $\{i_1, j_1\}$ (околі точки (i, j) із заданою імовірнісною мірою P_t). Випадковий рух точки (перехід з місця (i, j)) визначається околом T та імовірностями переходів P_t . Для коректності алгоритму генерації агрегації необхідна умова замкнутості G відносно випадкового руху точки та доступності елементів множини A з C . Ці умови полягають в тому, що будь-яка точка, починаючи свій рух з C , досягне G або A за скінчене число кроків.

Таким чином, процес генерації агрегації A_1 , обмеженої дифузією, визначається сімкою $\langle M, A_0, C, P_c, G, T, P_t \rangle$ та наступним алгоритмом:

1. $A = A_0$.
2. З множини C згідно з P_c визначається пара (i, j) .
3. Відносно (i, j) згідно з P_t визначається нове положення точки (i_1, j_1) з множини T .
4. Якщо $(i_1, j_1) \in G$, тоді повернутися до кроку 2. Точка вийшла за межі поля генерації.
5. Якщо $(i_1, j_1) \in A$, тоді $A = A \cup (i, j)$; перехід на п. 2.
6. $(i, j) = (i_2, j_1)$; перехід на п. 3.

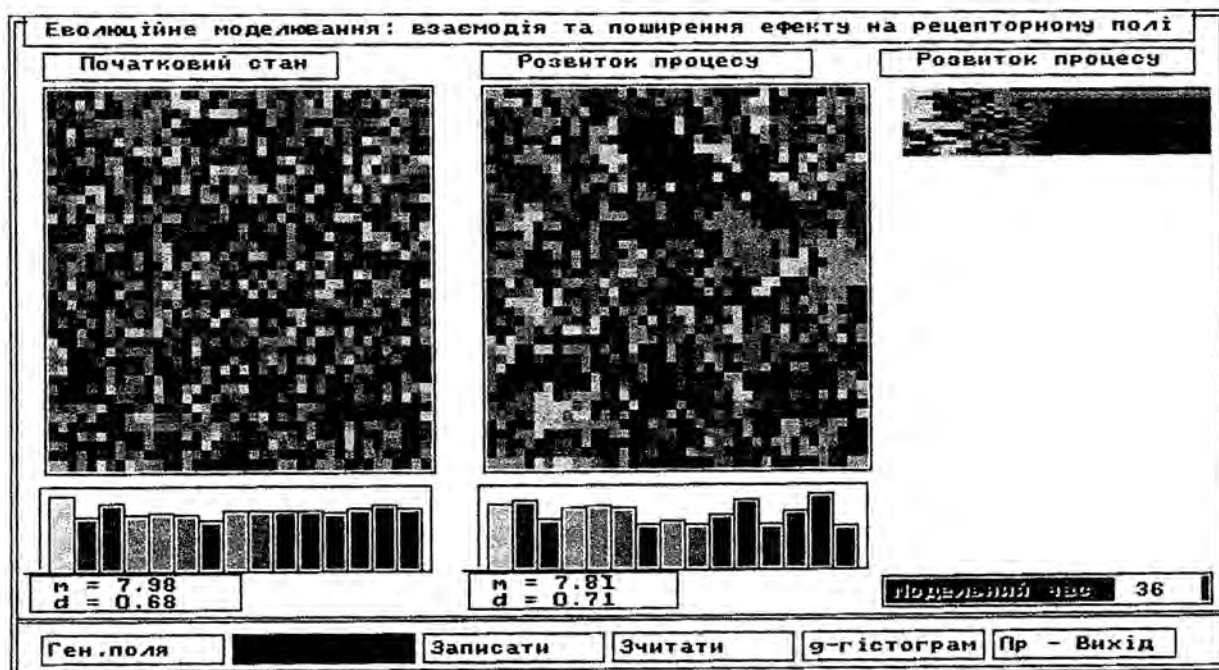


Рис. 3. Моделювання взаємодії та поширення ефекту на рецепторному полі

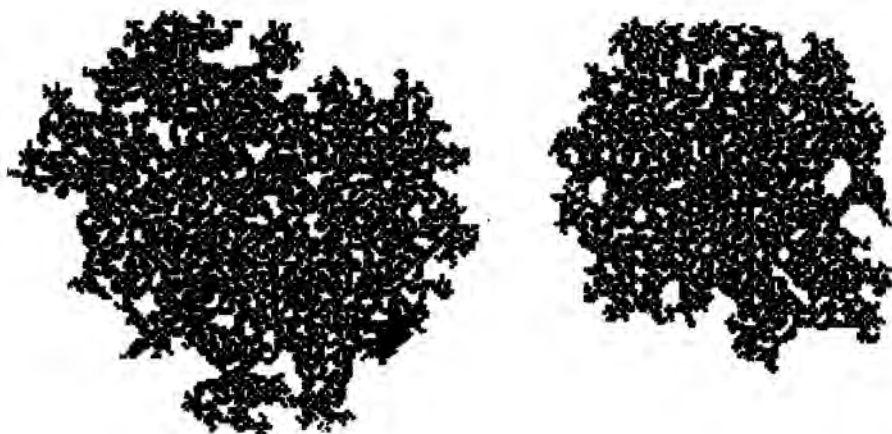


Рис. 4. Моделювання агрегації обмежених функцією

Завершення генерації можна задати будь-якою внутрішньою умовою алгоритму або ззовні.

Інтерпретація елементів $m_{i,j}$, $(i, j) \in A$, може бути довільною. Це можуть бути одиниці, і коли всі $m_{i,j}$ рівні нулю, то агрегація A буде представлена бінарним зображенням. Якщо інтерпретувати $m_{i,j}$ як порядковий номер пікселя, що поновлює агрегацію, або «час» досягнення точки агрегації, то можна отримувати півтонові чорно-білі або кольорові зображення. В прикладах, наведених нижче, $m_{i,j}$ набуває значень нормованого «часу» досягнення точки агрегації; на екрані маємо кольорове зображення, а при друку — псевдопівтонове.

Розроблена програмна система дає широкий набір засобів такого моделювання (приклади моделювання на рис. 4).

Фрактали — це математичні об'єкти, які, на відміну від традиційних геометричних фігур цілої розмірності (лінія, площина) мають дробову розмірність. Фрактальні зображення, як правило, інваріантні відносно масштабу, мають складну і тонку структуру. Ці властивості дозволяють добре описувати зображення природних об'єктів: берегова лінія моря, дельти рік, гірський ландшафт, коралові покриття, текстури земної поверхні, вкритої рослинністю і т. п. Використання методики синтезу фракталів дозволяє компактно описувати та ефективно синтезувати зображення складних природних об'єктів і процесів. Ця властивість може використовуватися при кодуванні, зберіганні та передачі радіолокаційних зображень дистанційного зондування Землі.

Синтез фрактальних зображень, що базується на генерації множини Мандельброта, базується на ітерації $z = f(z, c)$, z, c — комплексні числа, $c =$

параметр, $z_0 = 0$. Для кожного значення c з фіксованого прямокутника на комплексній площині визначається збіжність чи розбіжність процесу ітерації. Цей процес відображається на полі зображення з відповідною інтерпретацією кожної точки — збіжності, розбіжності, «час» розбіжності і т. п. Приклади таких зображень наведені на рис. 5 (1–8) для ітерації $z = z^2 + c$.

На сьогодні існує і використовується багато програмних систем моделювання, обробки та розпізнавання зображень. Такі системи експлуатуються у вигляді автоматизованих робочих місць, графічних станцій, процесорів зображень. Як правило, це проблемно-орієнтовані, тематично-орієнтовані системи як за програмним, так і апаратним забезпеченням. Вони охоплюють широкий спектр розв'язання практичних задач.

Розробка автором нової системи моделювання та обробки зображень має на меті наступне. По-перше, використати і програмно реалізувати сучасні передові досягнення світової та вітчизняної інформаційної теорії і технології в галузі моделювання та обробки зображень. Використати сучасні «модерні» методи моделювання, які не були традиційними в обробці зображень. По-друге, створити систему, яка стане високоінтелектуальним інструментом наукових прикладних досліджень. В склад системи буде введено засоби системного та експертного аналізу, апарат управління та підтримки баз знань.

Таким чином, в руках користувача ця система стане інструментом оперативної маніпуляції зображеннями, моделями, алгоритмами обробки зображень та знаннями, набутими усіма користувачами системи.

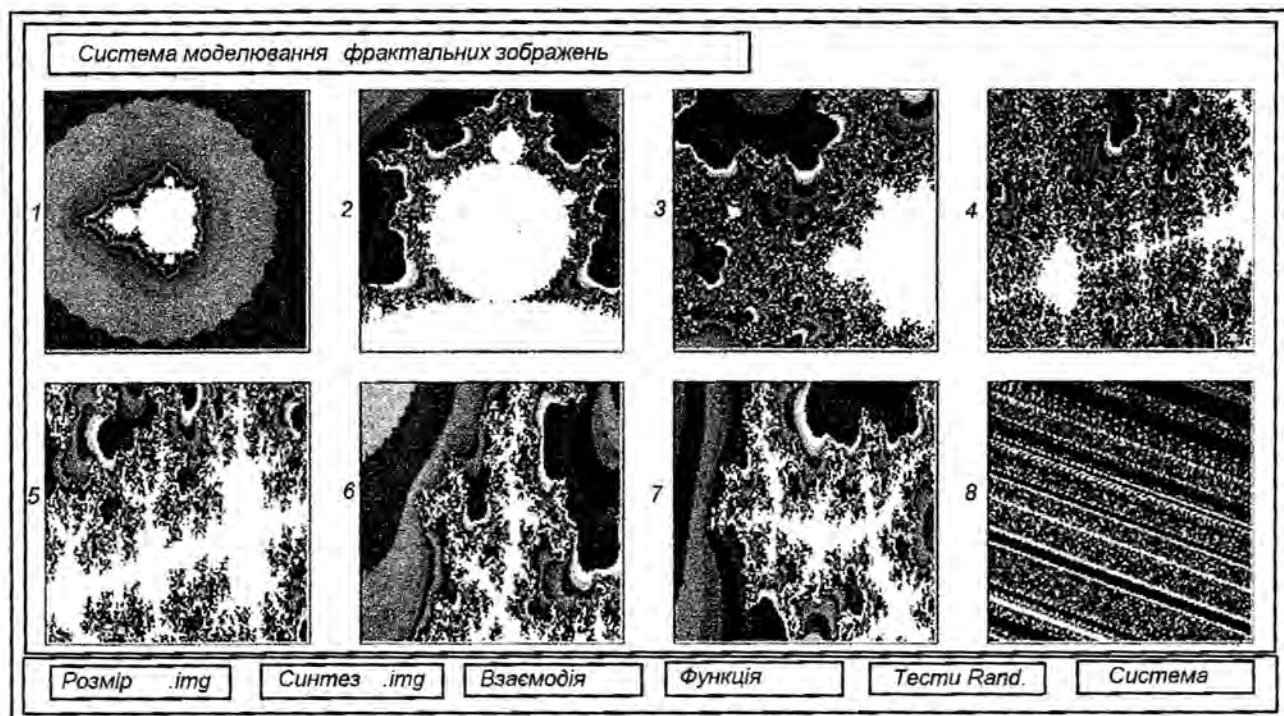


Рис. 5. Моделювання фрактальних зображень (множини Мандельбрата)

1. Ахметьянов В. Р., Пасмуров А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования земли. — М.: Радио и связь, 1987. — С. 70–81.
2. Белокур А. А. Методы сглаживания спекл-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности. — М.: Радио и связь, 1990. — С. 26–35.
3. Грицьк В. В., Кисиль Б. В., Паленичка Р. М. Математическое моделирование фонов и их взаимодействие с локальными объектами. — Львов, 1979. — 52 с. — (Препринт/АН УССР. Физ.-мех. ин-т; N 46).
4. Карвер К. Р., Элаши Ш., Улаби Ф. Т. // ТИИЭР. — 1985. — 73, № 6. — С. 75–87.
5. Параллельная обработка информации. Параллельные методы и средства распознавания образов / Под ред. В. В. Грицька. — Киев: Наук. думка, 1986. — Т. 3. — 280 с.
6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: В 2-х кн. — М.: Мир, 1982. — Кн. 1. — 310 с.; Кн. 2. — 790 с.

IMITATIVE MODELLING AND METHODS OF CHAOS THEORY AND FRACTALS IN SPACE RESEARCH

B. V. Kysil'

Approaches, mathematical models, algorithms for synthesis of images, noises and their interactions are considered. We obtained «Real» noised model for the images and noises (speckle noise, thermal noise, noise caused by atmospheric turbulence) which appear in the distance sounding of the Earth surface and other space objects. A graphical representation of the complex objects and physical processes which present themselves in the space research is presented. The algorithms developed are based on imitation models, the chaos theory, and fractal images.