

УДК 004.021:510.5

*Станкевич С.А., Шкляр С.В.*

## УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕХІДНОЇ ФУНКЦІЇ НА ЦИФРОВОМУ АЕРОКОСМІЧНОМУ ЗОБРАЖЕННІ

Дані про Землю, що отримуються за допомогою аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами, знаходять все більше застосування при вирішенні різноманітних народногосподарських і спеціальних задач [1]. Широке використання видових даних і повсюдне впровадження в практику цифрових технологій призводять до настійної необхідності розробки методик кількісної оцінки можливостей цих даних. Вжиття даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) високої розрізненості, отриманих сенсорами з дискретними фотоприймачами, вимагає проведення кількісної оцінки якості зображення. Особливо важливою є об'єктивна оцінка споживчих властивостей цифрових аерокосмічних знімків. Тому назріла потреба автоматизації аналізу якості матеріалів ДЗЗ на основі сучасних цифрових технологій за допомогою науково обґрунтованих методів та алгоритмів, що їх реалізують.

Зараз як стандарт оцінки якості відтворення зображень іконічними системами використовується експериментально визначена функція передачі модуляції (ФПМ) системи [2]. Використання ФПМ дозволяє споживачу одержати максимум інформації про передавальні властивості будь-якої іконічної системи або її ланок. ФПМ цілком описує якість відтворення зображень системою, має об'єктивний характер вимірювання і базується на добре опрацьованому математичному апараті [3].

Звичайно ФПМ цифрового зображення визначається як модуль дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) від дискретної похідної (функції розсіювання лінії) усередненої перехідної функції множини пограничних кривих, знайдених при аналізі цифрового зображення [4]. Перехідна функція системи (погранична крива) вимірюється об'єктивними інструментальними засобами та піддається строгому аналітичному опису.

Практично всі етапи розрахунків можуть бути реалізовані вже відомими методами: побудова перехідних функцій – операторами виділення перепадів цифрового зображення, розрахунок функції розсіювання лінії цифрового зображення – операторами дискретного диференціювання, обчислення ФПМ – стандартними бібліотеками дискретного або швидкого перетворення Фур'є [5]. Проте повсюдна доступність дешевих і потужних обчислювальних систем дозволяє сподіватися на запровадження в практику визначення ФПМ новітніх математико-статистичних методів з метою підвищення якості та надійності відповідних програмних процедур.

Найбільш корисні результати може бути досягнуто при удосконаленні алгоритмів визначення значущих перепадів цифрового зображення країв сегментів

аероландшафту і точного визначення перехідних функцій.

Виділення перепадів цифрового зображення. Виявлення та виділення країв цифрового зображення необхідно для оцінки ФПМ іконічної системи, за допомогою якої воно сформоване. Інтуїтивно краєм на зображенні звичайно виступає чітко визначена межа між двома областями (сегментами), кожна з яких має приблизно рівномірну яскравість. Точність визначення ФПМ пов'язана з якістю виділення краю, що передбачає вибір найбільших перепадів інтенсивності. Як правило, виявлення великих перепадів інтенсивності не викликає ускладнень [6]. Особливість даної задачі полягає в задоволенні умов належності виявленого різкого перепаду інтенсивності цифрового зображення реальній структурі стрибка вхідного оптичного сигналу. Крім того, алгоритм розпізнання найбільш різких перепадів повинен забезпечувати інваріантність до зміни середньої вхідної інтенсивності, бо на практиці для оцінки ФПМ різкий стрибок, слабкий за абсолютною величиною, має перевагу перед сильному, але розмитому [7]. Також важливо врахувати ступінь нерівномірності цифрового зображення з обох сторін краю. Ця нерівномірність генетично притаманна цифровим аерокосмічним знімкам і пов'язана з варіаціями відбивної або випромінювальної здатності поля об'єкту, похибками передавання оптичного сигналу крізь атмосферу (метеоумовами), шумами сенсора тощо.

В дослідженнях з цифровій обробки та розпізнавання зображень значна увага приділяється виділенню країв як детермінованих стрибків інтенсивності. Діапазон відомих підходів охоплює алгоритми від класичних кореляційних порівняння з еталоном до заснованих на спеціальних методах семантичного аналізу і розпізнання. Найбільш поширені дискретні кінцево-різнісні апроксимації різноманітних диференціальних операторів – Лапласа, Маклеода, Робертса, Собеля, Кірша, Уолліса з наступним пороговим обмеженням [8]. Основним недоліком всіх побудованих на їх основі способів є необхідність евристичного вибору порога чи його настройка за допомогою навчальних зображень. Крім того, диференціальні оператори не виправдано чутливі до шумів цифрових зображень [9].

Часто використовується безпосереднє виділення контурів цифрового зображення шляхом переходу в простір параметрів, чутливих до його форми, але інваріантних до розміру та орієнтації. Прикладом такого переходу може вважатися узагальнене перетворення Радона [10] або надлишкове перетворення Хо [11] цифрового зображення. Загальний недолік подібних перетворень – обмеженість можливих форм контуру, що виявляється і дуже великі обчислювальні витрати.

В [12] запропоновано статистичний метод виділення зображення перепаду, який засновано на імовірнісному перетворенні фрагменту цифрового зображення, що аналізується. Імовірнісне перетворення обчислює для кожної точки фрагменту цифрового зображення імовірність безпомилкового розділення верхнього та нижнього б'єфів перехідної функції вздовж обраного напрямку. Очевидно, що чим вище ця імовірність, тим краще якість даної реалізації перехідної функції, оскільки вона за визначенням, відображає ідеальний детермінований стрибок сигналу [13]. Крім того, імовірнісне перетворення в неявній формі враховує вплив на якість цифрового знімку привнесених шумів. Й, нарешті, головною перевагою імовірнісного перетворення є осмисленість вихідних величин (імовірностей), що знімає проблему вибору порога при виділенні значущих перепадів: вони відбираються виходячи з необхідного рівня вірогідності.

Статистичний метод виділення зображення перепаду використовує класичний

імовірнісний апарат і ґрунтується на припущенні про добру статистичну розділимість областей цифрового знімку, між якими будується перехідна функція. При цьому розподіл її інтенсивності є графічним виразом краю [14]. Структурний опис перехідної функції визначається детерміністським поданням сигналу краю зображення і задається напрямком, вздовж якого й будується розподіл інтенсивності. Імовірнісний характер зміни інтенсивності зображення краю враховується статистичним описом перепадів оптичного сигналу конкретної реалізації перехідної функції, а також шляхом побудови масиву різних її реалізацій.

Припустимо, що в точці  $E(x, y)$  цифрового зображення існує  $2n$  відліків інтенсивності  $E$  перехідної функції вздовж певного напрямку  $\alpha$ , причому перші  $n$  відліків ( $0 \dots n-1$ ) належать до нижнього, а наступні  $n$  відліків ( $n \dots 2n$ ) – до верхнього б'єфів перехідної функції. Імовірність правильного розділення б'єфів  $p(x, y, \alpha)$  запишеться як [15]

$$p(x, y, \alpha) = 1 - p_0 \cdot \epsilon_0(x, y, \alpha) - p_n \cdot \epsilon_n(x, y, \alpha) , \quad (1)$$

де  $\epsilon_0(x)$  та  $\epsilon_n(x)$  – умовні імовірності помилкової класифікації б'єфів,  $p_0$  та  $p_n$  – апіорні імовірності б'єфів.

Визначення напрямку перетину перехідної функції цифрового зображення.

Очевидно, що напрямком, вздовж якого робиться відлік точок перехідної функції, повинен відповідати нормалі до межі розділу областей цифрового зображення [6]. Класично напрямком, ортогональним до краю області, визначається як напрямком вектору градієнту  $\text{grad } E(x, y)$ , для якого похідна скалярного поля  $E(x, y)$  в точці має найбільше значення. Для фіксованого напрямку  $\alpha(x, y)$  повинна розглядатися величина проекції градієнту на нього:

$$|\text{grad } E(x, y)|_\alpha = \sqrt{\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2}} \cdot \cos[\alpha(x, y) - \chi(x, y)] , \quad (2)$$

де  $\chi(x, y)$  – аргумент градієнта в точці:

$$\chi(x, y) = \text{arctg} \frac{\partial E(x, y) / \partial y}{\partial E(x, y) / \partial x} . \quad (3)$$

Вимірювання інтенсивності перехідної функції робиться в точках дискретного зображення за напрямком, перпендикулярним до межі розділу областей. На практиці застосування точних виразів (2) та (3) ускладнено внаслідок дискретної природи цифрового зображення. При оперуванні в околиці точки відстанями, порівняними з розмірами елемента дискретизації (піксела) виникають значні похибки визначення координат точок і, відповідно, значень інтенсивності цифрового зображення в них. Означені складнощі негайно вимагають інтерполяції цифрового зображення в потрібних точках, що також неминуче вносить похибки у виміри.

Розглянемо квадратний фрагмент зображення розміром  $2n \times 2n$  пікселів з початком координат в його центрі. Припустимо, що цей фрагмент містить перехідну функцію, зняту вздовж напрямку  $\alpha$ , яку задано таблично у вигляді  $E(x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha)$ ,  $x, y = 0 \dots 2n-1$ . Виберемо напрямком  $\alpha$  таким, що

$$\sum_{x,y=0}^{2n-1} |f(x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha) - E(x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha)| \rightarrow \min, \quad (4)$$

причому мінімум береться по всіх монотонно зростаючих функціях  $f(\cdot)$ . Оскільки перехідна функція іконічної системи описує нерозривний перехід між фізично існуючими сегментами оптичного сигналу різної інтенсивності, то можливо припустити її монотонне зростання в середньому. В багатьох дослідженнях дискретна перехідна функція апроксимується монотонними аналітичними залежностями, наприклад, на основі арктангенса [16].

Для знаходження монотонної функції  $f(\cdot)$  максимального наближення (4) спроєкуємо всі точки фрагмента зображення, що розглядається, на пряму напрямку  $\alpha$ . Точки  $(x, y)$ ,  $x, y = 0 \dots 2n-1$  розіб'ємо на  $4n^2$  (або менше – якщо проєкції співпадають) кластерів, впорядкованих згідно значення  $x \cos \alpha + y \sin \alpha$ . Якщо для двох сусідніх кластерів медіана значень  $E(x, y)$  на елементах першого кластера більша, ніж на елементах другого, об'єднаємо ці кластери. Так будемо робити доти, доки медіана значень  $E(x, y)$  на елементах кластера не стане зростаючою функцією від номера кластера. Покладемо  $f(x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha)$  рівним медіані значень  $E(\cdot)$  на кластері, що містить точку  $(x, y)$ . Порядок злиття кластерів не має значення. Одержана послідовність й буде задавати функцію  $f(\cdot)$  таблично.

Визначення напрямку перетину перехідної функції доцільно виконувати на наборі натівних для дискретної сітки можливих напрямків (секторів) [17], з наступним вибором того з них, яке найкраще задовольняє умові (4). Для фрагмента розміром  $2n \times 2n$  точки проєктуються на пряму не менш ніж  $4n^2$  ( $4n^2$  – обмеження знизу, для великих  $n$  воно дорівнює  $4,86n^2$ ) можливими способами, тому запропонований алгоритм може визначити лише  $(8 \div 9,72) \cdot n^2$  секторів, яким може належати напрямок  $\alpha$ . Точна формула для визначення цієї кількості буде  $8 \cdot \sum_{i=1}^{2n-1} \varphi(i)$ ,

де  $\varphi(\cdot)$  – функція Ейлера. При цьому похибка визначення напрямку не буде перевищувати  $\text{arccctg}(2n-1)$  – максимум або  $\text{arccctg} 8(n-1)^2$  – мінімум.

Якщо напрямок  $\alpha$  визначено, далі виконується імовірнісне перетворення цифрового зображення (1) вздовж нього. Для кожної точки цифрового знімка слід зберегти не тільки значення імовірності, але й код напрямку, вздовж якого її розраховано.

Розглянутий статистичний метод не потребує попередньої оцінки імовірнісних розподілів і надає безпосередню оцінку імовірності для кожної точки перепаду. Для практичної реалізації виділення та відбору реалізацій перехідної функції цифрового зображення необхідно алгоритм імовірнісного перетворення вхідного фрагменту доповнити процедурами аналізу за всіма натівними напрямками перетину і вибору найкращого з них у відповідності з (4). При цьому рішення щодо придатності поточної реалізації перехідної функції цифрового зображення для наступного використання доступно відразу після визначення найкращого натівного напрямку, не вимагає збереження проміжних результатів і повернення до них на наступному циклі обробки всього фрагменту. Таким чином значно знижуються витрати обчислювальних ресурсів та пам'яті підсистеми цифрової обробки.

Окрім вибраного напрямку перетину, важливим параметром імовірнісного перетворення є число використаних відліків перехідної функції  $n$ . В ідеалі воно



повинно бути якомога великим щоб, по-перше, гарантовано покрити зону розмиття краю та, по-друге, підвищити статистичний рівень значимості, який прямо залежить від обсягу вибірки. Зокрема, при  $2n > 30$  замість критеріального  $t$ -розподілу допустимо використовувати нормальний розподіл [18]. З іншого боку, надмірне збільшення числа відліків перехідної функції призводить до ризику виходу за межі однорідної області перепаду, та, відповідно, привнесенню викривлень до імовірного перетворення (1). Що стосується розмірів самої зони розмиття, те для сучасних іконічних систем ДЗЗ параметри дискретного фотоприймача та аналогової частини, як правило, узгоджено, що забезпечує ширину зони розмиття різкого краю не більш декількох пікселів цифрового зображення. Виходячи з викладеного вище, доцільним здається вибір параметру  $n$  в межах 16 .. 32.

Рис.1 ілюструє можливості імовірного перетворення фрагмента цифрового космічного знімку за удосконаленим алгоритмом. Градації пікселів перетвореного фрагмента цифрового зображення пропорційні рівням імовірності  $p(x, y, \alpha)$ .

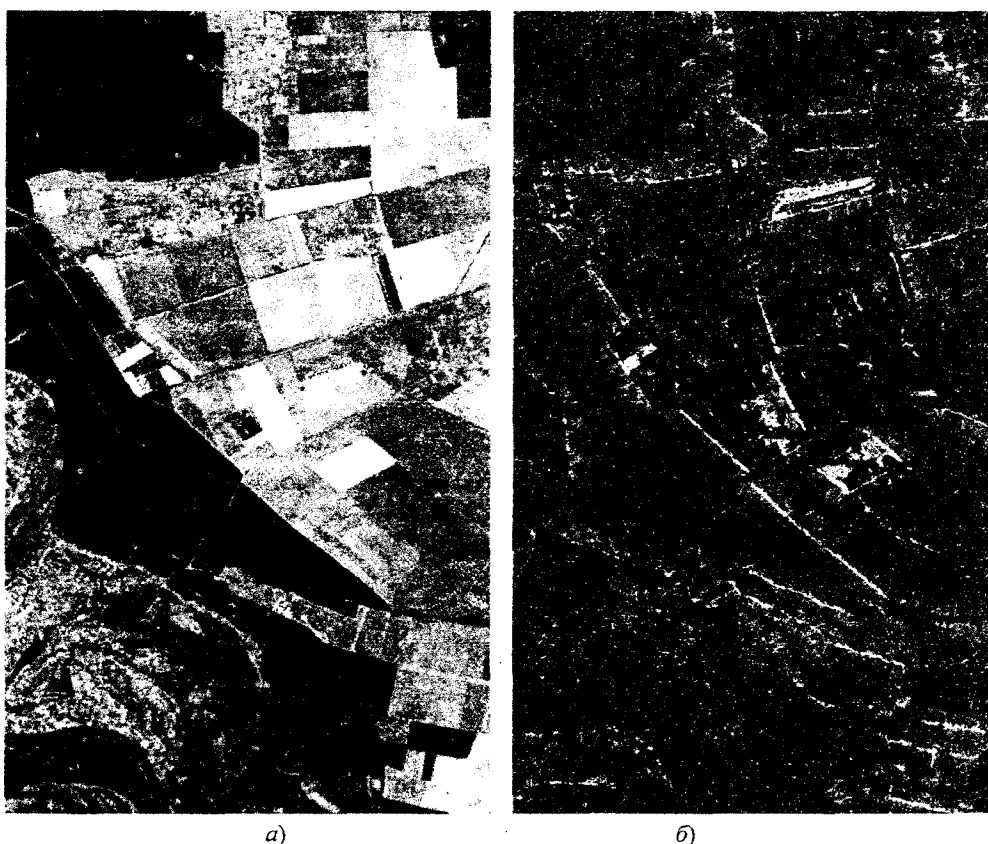


Рис.1. Імовірнісне перетворення фрагмента цифрового космічного знімка:  
а – вхідне зображення, б – перетворене зображення

Описаний алгоритм може бути застосований при обчисленні ФПМ сенсорів іконічних систем ДЗЗ для одержання об'єктивної оцінки якості їх аерокосмічних знімків.

## Література

1. Лялько В.І. Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні // *Космічна наука і технологія*, 2002.- Т.8.- № 2/3.- С.29-35.
2. *Optical Transfer Function – Principles and Procedures of Measurement / ISO 9335:1995 Published Standard.*- 20 p.
3. Boreman G.D. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems.*- Bellingham: SPIE Press, 2001.- 120 p.
4. Williams T.L. *The Optical Transfer Function of Imaging Systems: Application and Measurement.*- Bristol: IOP Publishing, 1998.- 250 p.
5. Шульман М.Я. *Измерение передаточных функций оптических систем.*- Л.: Машиностроение, 1980.- 208 с.
6. Смирнов М.В. *Распознавание изображения края полуплоскости в задаче количественного анализа изображений // Применение методов оптической обработки изображений.*- Л.: РТП ЛИЯФ, 1986.- с. 93-103.
7. Станкевич С.А. *К оценке линейного разрешения цифровых аерокосмических снимков // Космічна наука і технологія*, 2002.- Т.8.- № 2/3.- С.103-106.
8. Прэтт У. *Цифровая обработка изображений.*- Пер. с англ.- М.: Мир, 1982.- 480 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.*- М.: ТехноСфера, 2004.- 832 с.
10. Станкевич С.А. *Узагальнене перетворення Радона як основа сегментації цифрових аерокосмічних знімків // Праці Київського інституту ВПС.*- Вип.8.- Київ: КІ ВПС, 1998.- С.25-31.
11. Марков С.Ю. *Избыточное преобразование Хо // Информационные технологии в дешифрировании изображений: методология, модели, алгоритмы.*- Киев: МО Украины, 1993.- С.22-28.
12. Popov M.A., Stankevich S.A. *About Restoration of the Scanning Images Received Onboard a Sich-1M Space Vehicle by Inverse Filtering Method // Proceedings of 31-st International Symposium on Remote Sensing of Environment.*- Saint Petersburg, 2005.- In print.
13. Rakesh R.R., Chaudhuri P., Murthy C.A. *Thresholding in Edge Detection: A Statistical Approach // IEEE Transactions on Image Processing*, 2004.- Vol.13.- No 7.- P.927-936.
14. Stankevich S.A. *The Linear Models of Optimal Synthesis of the Discretic Zonal Images // Proceedings of the Third All-Ukrainian Conference by Signal/Image Processing and Pattern Recognition.*- Kyiv, 1996.- P.149-152.
15. Fessler J.A. *Spatial Resolution and Noise Tradeoffs in Pinhole Imaging System Design: A Density Estimation Approach // Optics Express*, 1998.- Vol.2.- No 6.- P.237-253.
16. Смирнов С.А., Москвічов Д.В., Терлецький Р.П. *Методика оцінювання параметрів оптичної передатної функції атмосфери // Космічна наука і технологія*, 2004.- Т.10.- № 2/3.- С.51-58.
17. Хорн Б.К.П. *Зрение роботов.*- Пер. с англ.- М.: Мир, 1989.- 488 с.
18. Фукунага К. *Введение в статистическую теорию распознавания образов: Пер. с англ.*- М.: Наука, 1979.- 368 с.

Статья поступила в редакцию 19.05.05