

УДК 528.831.1

**С. А. Станкевич**

Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ

## Імовірісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аерокосмічних знімків

*Надійшла до редакції 05.08.05*

На основі імовірісного підходу обґрунтовано порядок обчислення еквівалентної просторової розрізненості та еквівалентної оптичної передавальної функції багатоспектральних аерокосмічних знімків, які описують передавальні властивості багатоспектральних іконічних систем у термінах просторово-частотного аналізу. Вирішено задачу об'єктивного і зрозумілого оцінювання багатоспектральних зображень, яке відповідає загальноприйнятим моделям та міжнародним стандартам.

Просторово-частотні методи є потужним, зручним та широко розповсюдженим інструментом аналізу і оцінювання іконічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), який практично застосовується вже декілька десятиріч [5].

Тракт проходження оптичного сигналу (починаючи від об'єкта випромінювання, середовища між об'єктом та іконічною системою аж до перетворення сигналу до зображення) подається складеним з окремих послідовно з'єднаних оптичних ланок. Система перетворює розподіл оптичного випромінювання в площині об'єкта  $E_0(x)$  до розподілу у площині зображень  $E(x)$ .

Передавальні властивості ланки описуються сигналом на її виході при подачі деякого стандартного сигналу спеціального вигляду на вхід. Найбільш розповсюдженою є імпульсна передавальна функція  $h(x)$  — реакція системи на одиничний вхідний імпульс —  $\delta$ -функцію, причому

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (1)$$

При аналізі іконічних систем  $h(x)$  носить назву функції розсіювання точки (ФРТ) і описує розподіл оптичного сигналу в зображенні ідеальної точки, утвореному іконічною системою. Повний оптичний сигнал у зображенні визначається імпульсною передавальною функцією через інтеграл-згортку:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x - \xi) h(\xi) d\xi = E_0(x) \otimes h(x). \quad (2)$$

Якщо оптичні сигнали  $E(x)$  описані просторово-частотними спектрами

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(x) \exp(-2\pi i \nu x) dx, \quad (3)$$

де  $\nu$  — просторова частота, то передавальні властивості іконічних систем характеризуються їхніми оптичними передавальними функціями (ОПФ). Оптична передавальна функція  $H(\nu)$  визначається як відношення комплексного просторово-частотного спектру  $S(\nu)$  сигналу на виході системи до комплексного просторово-час-

тотного спектру  $S_0(\nu)$  сигналу на вході:

$$H(\nu) = \frac{S(\nu)}{S_0(\nu)}. \quad (4)$$

Оскільки розподіл оптичного сигналу в зображенні описується інтегралом-згортокою (2), то між оптичною передавальною функцією  $H(\nu)$  та функцією розсіювання точки  $h(x)$  є однозначний взаємозв'язок: ОПФ і ФРТ одержуються один з одного прямим і зворотним перетворенням Фур'є:

$$H(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \exp(-2\pi i \nu x) dx, \quad (5)$$

$$h(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\nu) \exp(2\pi i \nu x) d\nu. \quad (6)$$

З виразу (4) випливає, що просторово-частотний спектр зображення (3) знаходиться як добуток просторово-частотного спектру вхідного оптичного сигналу  $E_0(\nu)$  і оптичної передавальної функції системи  $H(\nu)$ . При послідовному з'єднанні декількох передавальних ланок їхня спільна ОПФ визначається співвідношенням

$$H(\nu) = \prod_{j=1}^m H_j(\nu), \quad (7)$$

що суттєво полегшує аналіз іконічної системи цілком.

Але класичні просторово-частотні методи мають серйозні недоліки, які особливо чітко проявилися при введенні до експлуатації новітніх авіаційних та космічних систем ДЗЗ. По-перше, вони важко пристосовуються до аналізу багатоспектральних та гіперспектральних (десятки та сотні спектральних каналів) іконічних систем, яких зараз в ДЗЗ переважна більшість. Застосування багатовимірного перетворення Фур'є не вирішує проблеми, тому що не зводить оцінку системи до загальноприйнятого зрозумілого універсального показника, а просто переводить проблему багатовимірності у просторово-частотну область. Таким універсальним показником тривалий час була просторова розрізненість, але її залучення до багатовимірних іконічних систем зазнає певних труднощів, на практиці вживаються багато емпіричних методів злиття багатоспектральних зображень [7]. Роздільне оцінювання ОПФ окремих спектральних каналів

іконічних систем неефективне, оскільки не враховує взаємних зв'язків між зображеннями в каналах. По-друге, для визначення просторової розрізненості іконічної системи, окрім її ОПФ, додатково потрібна модель приведених шумів у системі, яка виражається функцією порогового контрасту [3]. Причому визначення моделі шумів ще не гарантує достовірності її впливу на результати виявлення корисного сигналу. По-третє, повсюдне впровадження іконічних систем ДЗЗ із дискретними багатовимірними фотоприймачами призводить до специфічних ефектів візуалізації та оброблення саме цифрових аерокосмічних знімків, що пов'язані з растрезацією зображень [1]. Особливо вказані ефекти заважають експериментальному визначенню ОПФ за цифровими аерокосмічними знімками. Загальною рисою всіх перелічених недоліків є статистичний характер процесів, що відбуваються в іконічній системі.

Подолати названі труднощі повністю або частково можна, якщо повернутися до первинної мети оцінювання просторової розрізненості іконічних систем, а саме — до виявлення об'єктів за знімками. Необхідно відзначити, що сам феномен розмиття зображення ідеальної точки в реальній іконічній системі тісно пов'язаний з оптичними аберациями, девіаціями реєстрування фотонів напівпровідниковими фотоприймачами та передаванням фотоелектронів мікроелектронними трактами, тобто з квантово-механічними, а значить, з принципово імовірнісними ефектами. В цьому контексті ФРТ слід розглядати як розподіл квантів в точці зображення, причому їхня кількість швидко зменшується від центра до країв. Якщо вважати початкову кількість квантів фіксованою та достатньо великою, ФРТ набуває сенсу густини просторового розподілу імовірності оптичного сигналу у вихідному зображенні іконічної системи  $f(x)$ :

$$f(x) = c \cdot h(x), \quad (8)$$

де

$$c = \text{const} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx}$$

— нормувальний множник, який дорівнює 1, якщо знехтувати втратами енергії сигналу або підсиленням.

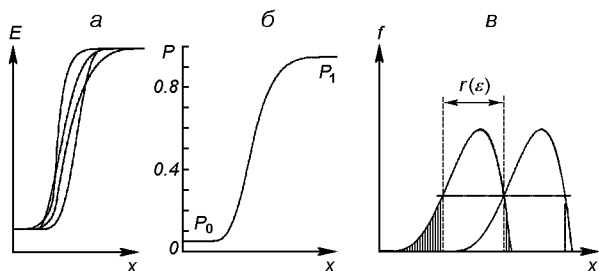


Рис. 1. Багатовимірна (а) та імовірнісна (б) перехідна характеристика багатоспектрального аерокосмічного знімка; в — густина розподілу імовірності в точці знімка і визначення імовірності правильного розділення ФРТ іконічної системи

З вищесказаного витікає суто імовірнісний характер виявлення об'єктів на аерокосмічних знімках, який практично не враховується класичним апаратом просторово-частотного аналізу, що розмиває поняття просторової розрізненості та примушує дослідників додатково залучати інші імовірнісні моделі виявлення об'єктів на зображеннях, подібні до формули Живичина [2].

Зараз використання статистичних методів обробки цифрових аерокосмічних зображень при оцінюванні просторової розрізненості здається досить перспективним, але більшість відомих підходів пов'язано з розділенням радіометричних полів, тобто не є уніфікованими. Разом з тим бажано не втрачати цінні напрацювання, які одержано у рамках просторово-частотного аналізу іконічних систем. Для одновимірних панхроматичних зображень використовується імовірнісне перетворення, яке обчислює для кожної точки зображення імовірність безпомилкового розділення верхнього та нижнього б'єсів перехідної характеристики, що відображає ідеальний детермінований стрибок сигналу між сегментами вздовж обраного напрямку [8]. Імовірнісне перетворення в неявній формі враховує вплив на якість зображення привнесених шумів. Імовірнісне перетворення легко узагальнюється на багатовимірні гіперспектральні знімки шляхом оцінювання імовірності за багатовимірними розподілами густини імовірності.

Нехай на багатоспектральному аерокосмічному знімку за допомогою імовірнісного перетворення з достовірністю  $1 - \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  — імовірність



Рис. 2. Визначення просторової розрізненості іконічної системи

помилки, або іншим способом виділено багатовимірну перехідну характеристику вздовж визначеного напрямку [4], як показано на рис. 1, а.

Якщо вздовж цього напрямку обчислити розподіл імовірності по просторовій координаті будь-якого з б'єсів — нижнього  $P_0$  чи верхнього  $P_1$ , одержимо одновимірну імовірнісну перехідну характеристику (рис. 1, б).

Просторова похідна  $f(x) = \partial P / \partial x$  цієї функції (рис. 1, в) є густиною розподілу імовірності в точці зображення (8).

Повертаючись до фізичного сенсу виразу (8), з відомих припущеннями можна вважати одержану функцію  $f(x)$  описом еквівалентної ФРТ багатоспектрального аерокосмічного знімка, причому еквівалентність забезпечується саме з точки зору прикінцевої мети оцінювання — виявлення елементарних об'єктів на зображенні.

Таким чином, імовірнісний підхід дозволяє згорнути багатовимірну ФРТ іконічної системи ДЗЗ до еквівалентної одновимірної без втрати інформативності та наочності одержуваних оцінок. Подальше застосування перетворення Фур'є (5) до еквівалентної ФРТ дозволяє визначити еквівалентну ОПФ іконічної системи і далі використовувати всі відомі методи просторово-частотного аналізу — обчислення функції передавання модуляції (ФПМ), оцінювання просторової розрізненості, синтез іконічних систем, інверсне фільтрування, злиття окремих зональних зображень різної розрізненості, тощо.

Крім того, просторову розрізненість іконічної системи можливо оцінити безпосередньо за еквівалентною ФРТ, якщо звернутися до класичного визначення розрізняювальної здатності: це величина, зворотна до мінімальної відстані між двома точками зображення, які ще сприймаються як окремі. За Релесем така відстань визначається між максимумом сигналу в ФРТ та першим дифракційним мінімумом. Але реальна

ФРТ іконічних систем в цілому завжди відрізняється від дифракційної внаслідок дуже багатьох факторів. І тут універсальним показником якості розділення точок залишається імовірність. Якщо дві ідентичні ФРТ зміщені одна відносно одної на відстань  $r$ , імовірність помилки  $\varepsilon$  може бути знайдено як

$$\varepsilon(r) = \int_{x \notin f^{-1}(r)} f(x) dx, \quad (9)$$

що ілюструється рис. 1, в.

Коли мова йде лише про оцінювання еквівалентної просторової розрізненості, вказаний спосіб дозволяє виключити з оброблення багатоспектральних аерокосмічних зображень перехід до частотної області, а також визначення порогового контрасту, що ілюструється рис. 2.

Імовірнісний підхід чітко висвітлює факт залежності еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних зображень від вхідної моделі об'єкта спостереження. Змінюється об'єкт або ансамбль об'єктів — змінюється еквівалентна розрізненість. На практиці це веде до необхідності оцінювати еквівалентну просторову розрізненість іконічних систем ДЗЗ не взагалі, а для вирішення типових тематичних задач, для яких систему призначено.

Викладений метод оцінки еквівалентної просторової розрізненості є актуальним внаслідок все ширшого застосування багатоспектральних аерокосмічних знімків для картування та інших задач ДЗЗ, де потрібна висока точність і об'єктивність вимірювань. Одержання еквівалентної ОПФ дозволяє повніше та теоретично обґрунтовано оцінювати передавальні властивості гіперспектральних іконічних систем при забезпеченні відповідності існуючим міжнародним стандартам просторово-частотного аналізу [6]. Всі описані процедури легко формалізуються та можуть бути впроваджені при розробці алгоритмічного і програмного забезпе-

чення технологій обробки гіперспектральних аерокосмічних знімків в Україні.

1. Мосов С. П., Станкевич С. А. Обмеження функції передавання модуляції фотоприймального растру // Тр. Академії.—2004.—Вип. 57.—С. 92—102.
2. Станкевич С. А. Уточнення відомої емпіричної формули оцінки імовірності правильного дешифрування об'єктів на аерокосмічному зображенні // Праці наук. центру Повітряних Сил Збройних Сил України.—2005.—Вип. 8.—С. 265—269.
3. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 3/4.—С. 81—84.
4. Станкевич С. А., Шкляр С. В. Удосконалений алгоритм визначення перехідної функції на цифровому аерокосмічному зображенні // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского.—2005.—18 (57), № 2.—С. 97—102.
5. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: Пер. с нем. — М.: Мир, 1978.—670 с.
6. Optical Transfer Function — Definitions and Mathematical Relationships. — Geneva: Publ. Standard, 1995.—25 p.—(ISO 9334).
7. Price J. C. Combining Multispectral Data of Different Spatial Resolution // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1999.—37, N 3.—P. 1199—1203.
8. Popov M. A., Stankevich S. A. About Restoration of the Scanning Images Received Onboard a Sich-1M Space Vehicle by Inverse Filtering Method // Proc. of the 31<sup>st</sup> International Symp. on Remote Sensing of Environment. — Saint Petersburg: ISPRS, 2005.—P. 488—490.

#### PROBABILISTIC-FREQUENCY EVALUATION OF EQUIVALENT SPATIAL RESOLUTION FOR MULTISPECTRAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich

A procedure for calculation of the equivalent spatial resolution and equivalent optical transfer function for multispectral aerospace images is justified on the basis of probabilistic approach. They describe transfer properties of multispectral imaging systems in terms of the spatially-frequency analysis. The problem of the objective and interpretable evaluation of the multispectral images is solved according to commonly accepted models and international standards.