

УДК 681.3:519.27

С. А. Станкевич

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень

Надійшла до редакції 14.01.05

Викладено порядок визначення порогової модуляції цифрового аерокосмічного зображення на основі статистичної моделі розділення його сегментів. Зіставлення геометричного розміру сегменту із відповідною просторовою частотою дозволяє побудувати функцію порогового контрасту цифрового знімка.

Можливості ефективного використання матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) безпосередньо залежать від їхньої якості, перш за все від лінійної розрізненості на місцевості. За поданням виробників і власників аерокосмічних систем ДЗЗ склалася традиція характеризувати якість одержуваних знімків просто розміром проєкції фотоприймального елемента на поверхню Землі скрізь оптичну систему апаратури, в кращому випадку враховуючи при цьому збільшення цього розміру за зміною кута візування [5].

Найбільш інформативною оцінкою іконічних систем ДЗЗ слід вважати функцію передавання модуляції (ФПМ). Ця характеристика повністю описує передавальні властивості всіх ланок системи, має об'єктивний характер вимірювання та базується на добре розвинутому та надійному математичному апараті [6]. Оскільки всі сучасні космічні та більшість авіаційних систем дистанційного зондування є цифровими або далі перетворюють зображення в цифрову форму, зараз у світі активно розроблюються та навіть стандартизуються [7] методи визначення ФПМ за цифровими аерокосмічними зображеннями.

Однак для визначення реальної лінійної розрізненості іконічної системи окрім її загальної ФПМ необхідна функція порогового контрасту — залежність мінімальної модуляції K , яка ще розрізняється системою, від просторової частоти ν . Розрізнявальна здатність іконічної системи визна-

чається точкою перетину ν^* загальної ФПМ $T(\nu)$ і функції порогового контрасту $K(\nu)$. Зміна розрізнявальної здатності іконічних систем при змінах просторової частоти оптичного сигналу є наслідком впливу шумів. Порогову модуляцію добре досліджено для фотографічних систем, але механічне поширення цих результатів на аерокосмічні системи з дискретними фотоприймачами [2] не є коректним, тому що вони мають іншу фізичну природу шумів, а для детектування, як правило, не залучається зоровий апарат людини. Мова скоріше повинна вестися про статистичне виявлення групи зв'язаних елементів растру цифрового зображення за їхніми спільними радіометричними характеристиками, в даному випадку — за оптичною модуляцією відносно сусідніх груп елементів растру [4]. Суттю цієї роботи є поєднання статистичного підходу з класичною просторово-частотною моделлю з метою обґрунтування порядку визначення функції порогового контрасту саме для цифрових аерокосмічних зображень.

Принципову стохастичність оптичних сигналів земних утворень, що реєструються іконічними системами ДЗЗ, обумовлено варіаціями структурного та геохімічного складу об'єктів спостереження, змінами зовнішніх геофізичних полів, погодних умов, оптичних властивостей середовища та освітлення, похибками калібрування та власними шумами каналів реєстрації. Дискретизація та скінченність діапазону відліків призводять до додаткових спотво-

рень цифрових аерокосмічних зображень. Поруч з тим дискретизація та скінченність дозволяють більш строго застосовувати статистичні моделі до аналізу цифрових зображень і одержувати результати за скінченне число операцій.

Розглянемо дві групи зв'язних елементів растру (пікселів цифрового зображення) із n елементів кожна, які утворено двома різними сталими входними сигналами E_1 та E_2 . Модуляція між ними складе

$$K = \frac{|E_1 - E_2|}{E_1 + E_2}. \quad (1)$$

Припустимо, що для зберігання лінійності відтворення рівні сигналів близькі до середини динамічного діапазону системи, а шуми мають нормальний розподіл з нульовим середнім. Тоді модуляцію (1) можна оцінити безпосередньо за цифровим зображенням [3] як

$$K = \frac{|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2}, \quad (2)$$

де $x = \alpha \cdot E$ — математичне очікування цифрового коду пікселів групи, α — коефіцієнт пропорційності. В рамках гауссівської моделі імовірність прийняття пікселом з області сигналу k -го рівня дискретизації, $k = 0 \dots n$, складе

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{k+0.5} \exp\left[-\frac{(k-x)^2}{2\sigma^2}\right] dx - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{k-0.5} \exp\left[-\frac{(k-x)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \\ &= \Phi\left(\frac{k+0.5-x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{k-0.5-x}{\sigma}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

де σ — приведенне до цифрового коду середнє квадратичне відхилення шумів, $\Phi(\cdot)$ — табульований інтеграл імовірностей. Знаючи параметри x і σ , можна побудувати повний розподіл $P(k)$,

$\sum_{k=0}^n P(k) = 1$, який при не дуже великих σ буде практично збігатися із нормальним. До речі, це можна зробити й для будь-якої іншої моделі, підставивши в (3) відповідні співвідношення.

Умовою граничної виділимості групи пікселів є сприймання сигналу від них як від одного цілого, тобто їхня статистична нерозрізненість в групі. А їхня кількість n^* , мінімально необхідна для розділення, буде відповідати пороговій просторовій частоті для заданої модуляції K .

Очевидно, що сумарний сигнал групи з n пікселів буде знаходитися в межах від 0 до nw , а розподіл суми n гауссівських випадкових величин є гауссівським із середнім nx та дисперсією $n\sigma^2$ [1]. Тому є всі необхідні дані для побудови розподілу імовірності сумарного сигналу по аналогії з (3):

$$P(n, k) = \Phi\left(\frac{k+0.5-nx}{\sigma\sqrt{n}}\right) - \Phi\left(\frac{k-0.5-nx}{\sigma\sqrt{n}}\right), \quad (4)$$

$$k = 0 \dots nw.$$

Якщо відомі розподіли $P_1(n, k)$ та $P_2(n, k)$ для двох різних сумарних сигналів з параметрами x_1, σ_1 та x_2, σ_2 , можна розрахувати імовірність їхнього правильного розділення при $x_1 < x_2$:

$$P(n) = \sum_{j=0}^{nw-1} \sum_{k=j+1}^{nw} P_1(n, j) P_2(n, k). \quad (5)$$

Із зростанням числа n імовірність $P(n)$ прямує до 1.

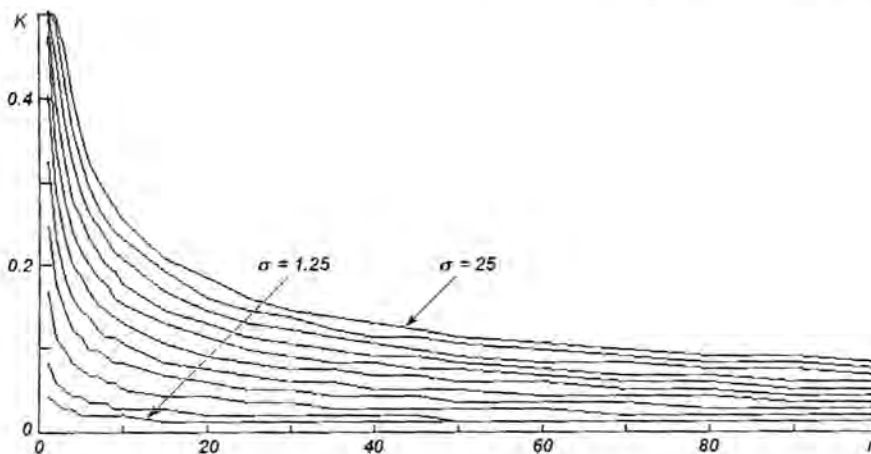


Рис. 1. Порогові модуляції сегментів з різними рівнями шумів



Рис. 2. Цифровий космічний знімок апаратури ASTER супутника «Тегга» (Київ — Бориспіль, 15 квітня 2004 р.)

тому для будь якої можливої модуляції $K \geq \frac{1}{w}$

можна знайти таке n^* , що забезпечить розділення сегментів цифрового зображення з наперед заданою імовірністю P^* . Як показують числові експерименти, для сучасних 8-бітових цифрових аерокосмічних зображень величина $P(n)$ швидко сягає одиниці у межах машинної точності, якщо математичні очікування сегментів обираються поблизу середини діапазону радіометричних рівнів.

На рис. 1 показано розраховані згідно із гаусівською моделлю залежності порогової модуляції від кількості пікселів у сегменті для різних середніх квадратичних відхилень шумів ($\sigma = 1.25...25$).

Кількість пікселів у сегменті є пропорційною до квадрата його лінійного розміру l . Для компактних сегментів можна вважати $l \approx \sqrt{n}$, для протяжних це правило може порушуватися. Кожному лінійному розміру відповідає власна просторова частота ν :

$$\nu = \frac{1}{2d_0l} \approx \frac{1}{2d_0\sqrt{n}}, \quad (6)$$

де d_0 — лінійний розмір піксела цифрового зображення. Тепер, знаючи фізичний розмір фотоприймального елемента апаратури ДЗЗ та приведене середнє квадратичне відхилення шумів, можна розрахувати функцію порогового контрасту у традиційному вигляді. Більш того, вказане середнє квадратичне відхилення можна визначити безпосередньо на цифровому зображенні в зонах приблизно рівномірного тону.

На рис. 2 показано цифровий аерокосмічний знімок території України, одержаний 15 квітня 2004 р. за допомогою апаратури дистанційного спостереження ASTER дослідно-моніторингового супутника «Тегга». Середнє квадратичне відхилення сигналу в статистично рівномірних сегментах для середньої частини динамічного діапазону після радіометричної корекції для цього знімка складає $\sigma = 12...15$.

На рис. 3 наведено перераховану за (6) із розміром фотоприймального елемента $d_0 = 15$ мкм функцію порогового контрасту, і, для ілюстрації порядку визначення розрізняльної здатності

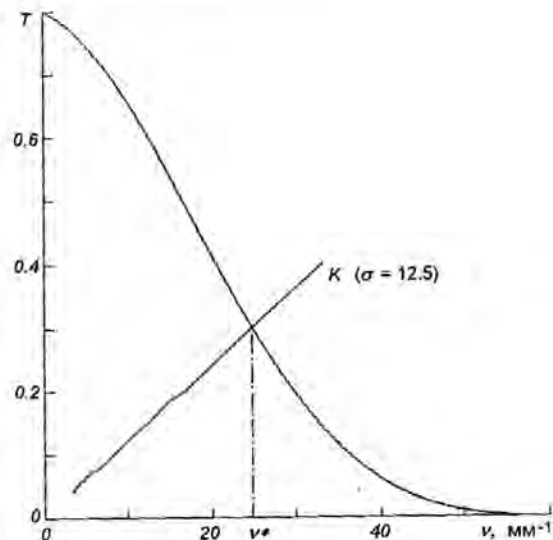


Рис. 3. Функція порогового контрасту для цифрового знімку рис. 2

іконічної апаратури ASTER за цифровим зображенням — теоретичну ФПМ космічної системи дистанційного зондування «Тетра».

Таким чином, викладений підхід дозволяє теоретично визначити залежності порогової модуляції від розміру сегмента для цифрових аерокосмічних зображень, а при їхній наявності — вимірювати їх експериментально. Це в сукупності з теоретичними або експериментально одержаними ФПМ іконічних систем ДЗЗ надає змогу об'єктивно, згідно з міжнародними стандартами оцінювати якість цифрових аерокосмічних зображень, що формуються ними, перш за все — реальну лінійну розрізненість на

місцевості. Визначення порогової модуляції є необхідною складовою прийнятої Національним космічним агентством України методики оцінки цифрових матеріалів дистанційного зондування Землі.

1. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.— 432 с.
2. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космічна наука і технологія.— 2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соффера. — М.: Физматлит, 2003.—784 с.
4. Станкевич С. А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5.—С. 12—15.
5. Станкевич С. А., Захаров О. Б. Геометрична складова лінійного розрізнення космічної оптико-електронної апаратури дистанційного спостереження // Тр. Національної академії оборони України.—2001.—Вип. 26.—С. 41—47.
6. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: Пер. с нем. — М.: Мир, 1978.—670 с.
7. Boreman G. D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. — Bellingham: SPIE Press, 2001.— 120 p.

STATISTICAL APPROACH TO DETERMINATION OF THRESHOLD MODULATION OF DIGITAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich

The routine of determination of threshold modulation of digital aerospace images is presented. The routine is developed as statistical model of image segments separation. A correlation between the geometrical dimension of a segment and the corresponding spatial frequency makes possible the construction of the threshold modulation function of a digital image.