

## ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗНІМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ СУПУТНИКА LANDSAT 7

В. Шевчук, Х. Бурштинська, О. Садовська  
Національний університет “Львівська політехніка”

Таблиця 1

Характеристики каналів  
космічного апарату Landsat 7

Номер каналу	Розрізнення, м	Спектральний діапазон, нм
1	30	450–515
2	30	525–605
3	30	630–690
4	30	760–900
5	30	1550–1750
6	60	10400–12500
7	30	2080–2350
8	15	520–900

**Ключові слова:** космічна знімальна система, спектральний канал, просторове розрізнення, спектральний діапазон, космічні зображення, функція передавання модуляції, межева крива, нормована щільність.

### Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Для вивчення природних ресурсів Землі з космосу запущено багато ШСЗ. Одними з перших ресурсні супутники запустили США. У липні 1972 р. полетів перший з таких супутників ERTS (Earth Resources Technological Satellite). На ньому вперше було випробувано телевізійний спосіб знімання. До того знімали фотокамери. В січні 1975 р. запущено другий супутник цієї серії, який перейменували на Landsat з аналогічною апаратурою. Нині Landsat 1, 2, 3, 4 вже не діють. Landsat 6 не вийшов на розрахункову орбіту і згорів у щільних шарах атмосфери. Запущений у 1999 році Landsat 7 перебуває на орбіті і передає дані.

На борту супутника Landsat 7 [7, 8, 9] встановлено апаратуру ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) – мультиспектральний сканувальний радіометр оптико-механічного типу. Починаючи з липня 1999 р. цей сенсор веде постійне знімання поверхні Землі з періодом в 16 днів (орбітальний цикл).

Вихідні дані космічної знімальної системи Landsat 7 ETM+:

- висота знімання – 705 км;
- фокусна відстань – 2,438 м;
- відносний отвір – 1:6;
- кут огляду – 14°,79;
- розмір елемента – 51,9 мкм;
- кількість елементів – 12200;
- поперечне охоплення – 183 км.

Сенсор ETM+ здійснює збирання даних у восьми спектральних каналах (табл. 1). Просторове розрізнення у видимих та інфрачервоних каналах становить 30 м, розрізнення панхроматичного зображення – 15 м, а розрізнення термального каналу – 60 м. Шостий канал складається з двох підканалів – 6.1 і 6.2.

Супутник Landsat 7 може знімати і передавати до 532 зображень за добу. Він перебуває на полярній, геліосинхронній орбіті і пролітає над всією поверхнею планети. За висоти 705 км повне сканування поверхні здійснюється за 232 оберти або 16 діб. На відміну від попередньої апаратури, на Landsat 7 встановлено масив пам'яті на 378 Гб (приблизно 100 зображень). Основною істотною перевагою знімальної системи ETM+ є наявність панхроматичного каналу високого розрізнення (15 м).

Впродовж понад трьох десятиліть супутниками Landsat було отримано спеціалізовані цифрові зображення континентів Землі і прилеглих приберегових районів. Це дало змогу пояснювати як природні явища, так і антропогенні зміни довкілля.

Сьогодні дані із супутника Landsat використовують для вирішення основних наукових питань, ухвалення рішень у таких різноманітних сферах людської діяльності, як сільське господарство, лісове господарство, землекористування, водні ресурси і освоєння природних ресурсів [1, 2, 5].

Зображення із супутника Landsat слугують для аналізу зростання глобальної урбанізації і виключення приберегових водно-болотних угідь, вивчення змін в рослинному покриві, землекористуванні, для дослідження коралових рифів, тропічних лісів і льодовиків Антарктиди тощо.

Для успішного використання космічних зображень необхідно визначати їх передавальні характеристики.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

У теорії зв'язку, кібернетиці та теорії інформації детально опрацьовано теоретичну основу для інформаційних каналів, яка базується на теорії лінійних систем. В цій теорії кожен елемент системи незалежно від її фізичної природи подають у вигляді лінійної ланки, яка має вхід і вихід. Властивості системи повністю описуються її передавальними характеристиками. Зазвичай розглядають три передавальні функції – імпульсну або вагову характеристику як реакцію системи на  $\delta$ -функцію; перехідну характеристику – реакцію системи на одиничний стрибок і частотну передавальну функцію – реакцію системи на набір синусоїдальних сигналів нескінченної довжини з різною частотою та однаковою амплітудою.

Ці три функції дають однакову інформацію про передавальні властивості системи і однозначно перераховуються одна в одну.

Стосовно знімальних систем, сигнали яких є двовимірними функціями просторових координат, аналогами передавальних функцій є:

1) функція розсіювання точки  $g(x, y)$  як реакція системи на нескінченну малу світляну точку або, для одновимірного випадку, – функція розсіювання лінії  $g(x)$ ;

2) межева крива  $E(x)$  – реакція системи на різкий край;

3) просторово-частотна передавальна функція  $P(N)$ , де  $N$  – просторова частота.

Основні чинники, які впливають на якість зображення, отриманого знімальною системою, доцільно подавати у вигляді впливів: атмосфери, літального апарата, оптичної системи, приймача інформації [2, 5, 6].

Для урахування всіх цих чинників знаходять просторово-частотні передавальні функції, тобто функції передавання модуляції (ФПМ) кожної із ланок, синтезуючи їх на кінцевому етапі дослідження знімальної системи. Однак можна скористатись наближеним методом знаходження ФПМ для конкретних знімальних систем, у цьому випадку супутника Landsat 7, що і є сутністю дослідження. В основу досліджень покладено визначення межових кривих каналів знімальної системи ЕТМ+.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Результативна функція передавання модуляції залежить від ФПМ багатьох ланок, насамперед, оптичної системи, сенсорів, шумів приймача, впливу зсувів зображення, стану атмосфери та інших чинників. Кожна із окремих

функцій передавання модуляції є складною. З певним наближенням можемо вважати, що результат добутку окремих складних кривих наближається до закону Гаусса [3]. Тому можливо апроксимувати результативну ФПМ знімальної системи, використовуючи нормальний закон Гаусса:

$$T_{\Sigma}(N) = \exp[-2\pi^2\sigma^2N^2], \quad (1)$$

де  $N$  – частота,  $\sigma$  – стала закону Гаусса, мм.

Отже, задача визначення результативної ФПМ зводиться до визначення постійної величини  $\sigma$ .

Запишемо вираз для функції розсіювання лінії, вважаючи, що розподіл освітленостей виражається нормальним законом:

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення щільностей.

Межева крива, яка передає зміни контрасту в зображенні напівплощини, записується через освітленість:

$$E(x) = \int_{-\infty}^x g(x) dx. \quad (3)$$

Нижня межа  $-\infty$  означає відстань від краю, де розсіяне світло не впливає на процес формування зображення. Враховуючи (2), межева крива, яка відображає розподіл освітленості на межі напівплощини, матиме вигляд:

$$E(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (4)$$

Для нормованої функції розсіювання лінії:

$$g_x = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

За  $\sigma = 1$  рівняння (4) переходить у рівняння Лапласа  $\Phi^*(x)$ :

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (6)$$

Задаючи  $x_1 = \sigma = 1$  і  $x_1 = -\sigma = -1$ , отримаємо дві точки межової кривої  $E(x_1) = 0,16$  і  $E(x_2) = 0,84$

### Експериментальні дослідження

Міркування щодо характеру результативної ФПМ, функції розсіювання лінії та межової кривої дають змогу визначити послідовність операцій знаходження сталої Гаусса з використанням конкретних космічних зображень.

На зображенні знаходять різкий край. Ним може слугувати, наприклад, зображення тіні від краю дахів будинків. Це зображення сканують в перпендикулярному до лінії різкого краю напрямі мікроденситометром або сканером.

За отриманими відліками будують нормовану межову криву. Значення подвійної сталої Гаусса  $\sigma$  знаходять на осі  $x$  між значеннями, які відповідають відлікам 0,16 і 0,84. Підставляючи значення  $2\sigma$  в рівняння (1), можна визначити ФПМ аерофотосистеми в польоті.

Для виконання досліджень було використано космічні знімки, отримані в різних каналах системою ETM+ космічного апарата Landsat 7 (2000 р).

Досліджувалась якість зображень за межою кривою для всіх каналів. Вимірювання здійснено на 100 профілях різкого краю. Краєм напівплощини слугувала границя ділянок гір зі сніговим покривом та затінених безсніжних ділянок. Виміряно щільності для кожного пікселя. Обчислення передбачало визначення усередненого значення щільності та визначення нормованої щільності.

#### Алгоритм визначення передавальних характеристик зображень

1. Вимірюємо щільності 100 профілів контрастних об'єктів попіксельно. Вибираємо об'єкти, де є різка межа між білим і чорним. Вимірюємо однакою кількість пікселів. Записуємо попрофільно в файл. Знаходимо середнє значення із всіх попіксельних вимірювань.

2. Визначаємо нормовану щільність.

3. Обчислюємо математичне сподівання і дисперсію ряду.

4. Знаходимо ділянку від  $\alpha$  до  $\beta$  (різниця пікселів та ймовірність):

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi^*(\beta - m/D) - \Phi^*(\alpha - m/D)$$

#### Канал № 1

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	81	0,05
2	85	0,17
3	91	0,34
4	97	0,56
5	101	0,73
6	105	0,81
7	107	0,89

Для кожного пікселя підраховуємо значення  $(x - m/D)$ , де  $m$  – математичне сподівання,  $D$  – середнє квадратичне відхилення.

5. Із таблиць [4] функції  $\Phi^*$  вибираємо значення нормованої щільності нормального розподілу.

На загальному рисунку для кожного каналу знімальної системи подано в таблицях усереднені значення нормованої щільності нормального розподілу, а на графіках – залежності між нормованими щільностями нормального розподілу та кількістю пікселів, які характеризують лінію розмитості.

Аналіз значень розмитості свідчить, що величина  $\sigma$  дорівнює 1,5 – 2 пікселям. Розмитість вказує на вплив атмосфери, дефокусування оптичної системи та дискретний характер побудови зображень. Деякі розходження між межовими кривими спричинені обмеженою кількістю експериментальних даних.

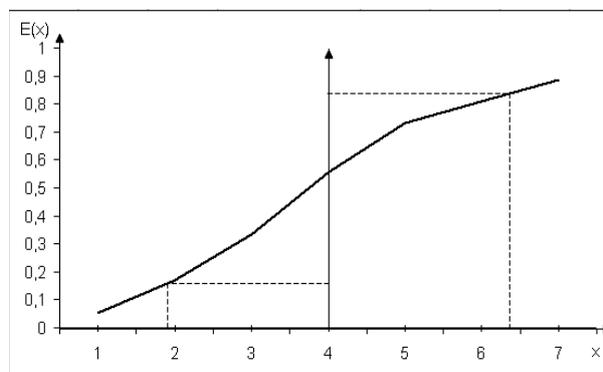
Крім визначення передавальних характеристик за межовими кривими, здійснювалось дослідження неоднорідності однаково експонованих ділянок. З цією метою виміряно оптичні щільності 50 пікселів для ділянок із світлими та темними тонами за 8\* збільшення для 3-го та 8-го каналів. Результати досліджень подано в табл. 2.

Таблиця 2

#### Характеристика неоднорідності однаково експонованих ділянок

Канали	Характер зображень, $\sigma D$	
	світлі	темні
3	0,011	0,017
8	0,019	0,034

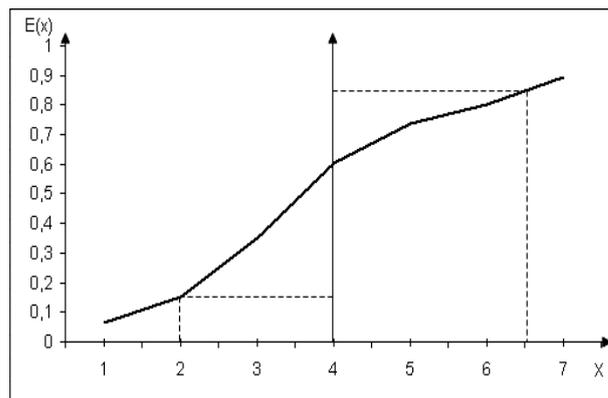
У табл. 2,  $\sigma D$  – середні квадратичні відхилення щільностей від середнього значення.



Межова крива розмитості зображень для каналів космічного знімка, отриманого з КЛА Landsat 7

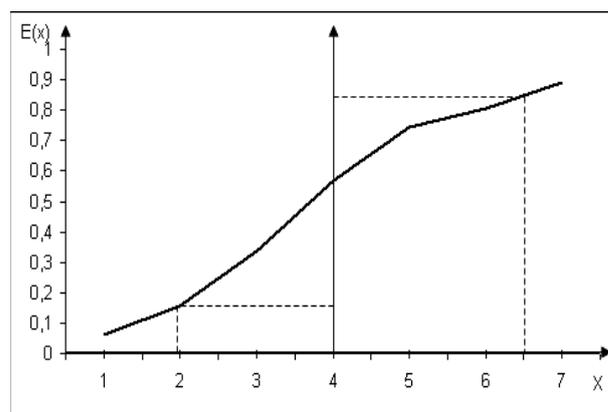
**Канал № 2**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	59	0,07
2	64	0,15
3	71	0,35
4	81	0,60
5	89	0,74
6	94	0,80
7	98	0,89



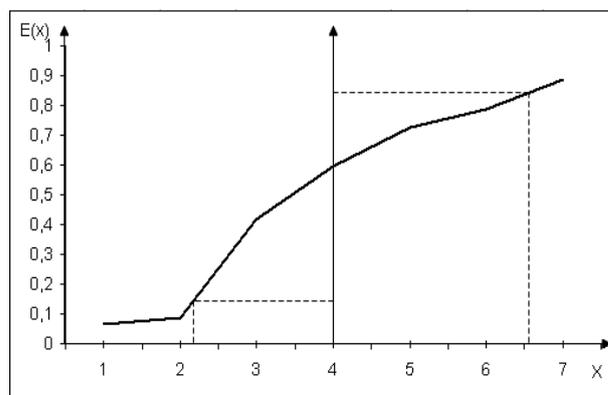
**Канал № 3**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	47	0,06
2	54	0,16
3	69	0,34
4	83	0,57
5	95	0,74
6	103	0,81
7	110	0,89



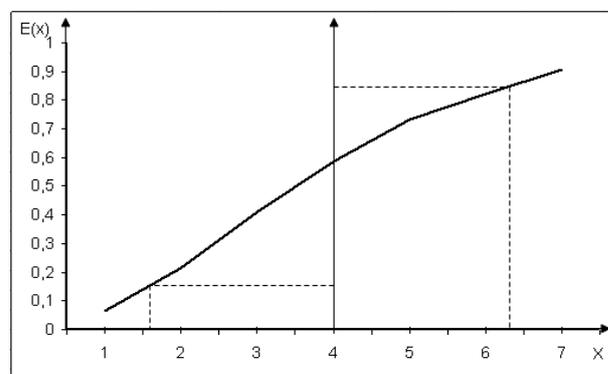
**Канал № 4**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	31	0,07
2	42	0,09
3	57	0,42
4	75	0,60
5	108	0,73
6	111	0,79
7	121	0,89



**Канал № 5**

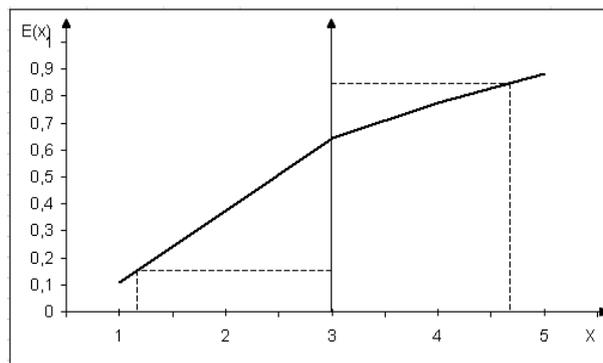
№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	40	0,06
2	49	0,21
3	61	0,41
4	71	0,59
5	83	0,73
6	95	0,82
7	102	0,90



*Межова крива розмитості зображень для каналів космічного знімка, отриманого з КЛА Landsat 7. (Продовження)*

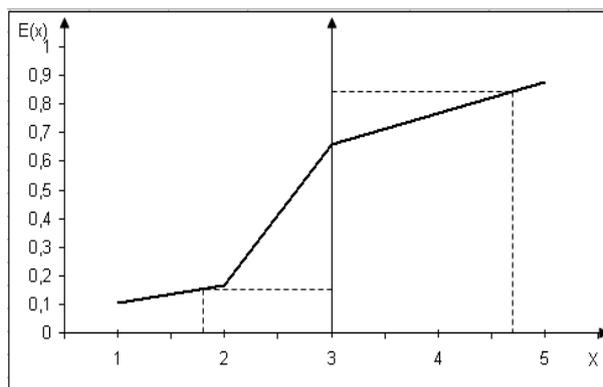
**Канал № 6.1**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	138	0,11
2	140	0,37
3	143	0,64
4	146	0,77
5	148	0,88



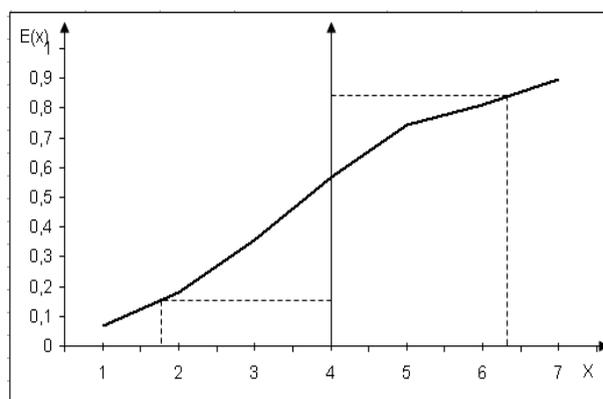
**Канал № 6.2**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	142	0,11
2	146	0,17
3	153	0,66
4	158	0,77
5	162	0,88



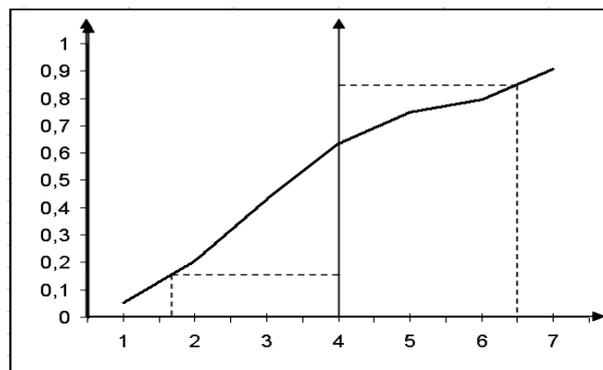
**Канал № 7**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	19	0,07
2	31	0,18
3	51	0,35
4	69	0,57
5	84	0,74
6	97	0,81
7	107	0,89



**Канал № 8**

№ з/п	Рівень сірого	Нормована щільність
1	60	0,05
2	76	0,20
3	105	0,43
4	146	0,64
5	191	0,75
6	229	0,80
7	250	0,91



*Межова крива розмитості зображень для каналів космічного знімка, отриманого з КЛА Landsat 7. (Закінчення)*

### Висновки

1. Запропоновану методику наближеного визначення функції передавання модуляції знімальних систем можна використовувати для порівняння якості зображень, отриманих різними знімальними системами.

2. Виконані експериментальні дослідження каналів знімальної системи ETM+ супутника Landsat 7 свідчать про розмитість, яка дорівнює 1,5 – 2 пікселам.

Неоднорідність щільностей однаково експонованих ділянок становить близько 0,01 – 0,03.

### Література

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялько і М.О. Попова. – К.: Наукова думка, 2006. – 357с.

2. Бурштинська Х. Аерофотографія. – Львів: АГАТ. – 1999. – 356 с.

3. Бурштинська Х., Береза О., Поліщук Б. До питання визначення функції передавання модуляції аерознімальних систем // “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. – 2007. – Вип. 68. – С. 163–171.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник. – М.: Наука, 1969. – 576с.

5. Живичин А.Н., Соколов В.С. Дешифрование фотограмметрических изображений. – М.: Недра, 1980. – 254 с.

6. Кононов В.І. Розрахунок роздільної здатності аерофотосистеми із врахуванням впливу факторів польоту // “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. – 2003. – Вип. 63. – С. 135–139.

### Інтернет-інформація

7. <http://www.Innoter.com/pagescameras/landsat.at.php>.

8. <http://www.pryroda.gov.ua/index.php?newsid=60>.

9. <http://www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/197/11.shtml>.

### Визначення передавальних характеристик знімальної системи супутника LANDSAT 7

В. Шевчук, Х. Бурштинська, О. Садовська

Описана методика визначення інтегрального значення розмитості зображень, отриманих знімальною системою ETM+ КЛІА Landsat7. Встановлена неоднорідність зображень за різних збільшень.

### Определение передающих характеристик съёмочной системы спутника LANDSAT 7

В. Шевчук, Х. Бурштинська, О. Садовська

Представлена методика определения интегрального значения размытости изображений, полученных съёмочной системой ETM+ КЛІА Landsat 7. Установлена неоднородность изображений при различных увеличениях.

### Determination of transmission characteristics of the satellite imaging system LANDSAT 7

V. Shevchuk, K. Burshtynska, O. Sadovska

The method for determination of the integral values of fuzzy images from imaging system ETM + Space Flyer Appliances Landsat 7. Established heterogeneity of images at different magnifications.

**15–17 September**  
**Skopje, Republic of Macedonia**  
**(FYROM)**

**International Conference**  
**on Spatial Data Infrastructures 2010.**  
**Co-sponsored by FIG.**

[http://sdi2010.evkartenn.com/?page\\_id=19](http://sdi2010.evkartenn.com/?page_id=19)  
[sdiconf2010@gmail.com](mailto:sdiconf2010@gmail.com)

**16–18 September**  
**San Jose, Costa Rica**

**Geomatics, an integral discipline**  
**at obtaining and processing**  
**geospace data.**  
**Co-sponsored by FIG**  
**Invitation brochure (pdf 4 Mb)**

<http://www.colegiotopografoscr.com/congreso2010/>