

УДК 528.7(075.8)

## ДО ПИТАННЯ ВПЛИВУ АТМОСФЕРИ НА ПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМІЧНИХ ЗНІМАЛЬНИХ СИСТЕМ

І. Долинська, Х. Бурштинська

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** космічний знімок, функція передавання модуляції, вплив атмосфери.

### Постановка проблеми та аналіз літератури

Для забезпечення космічної діяльності в Україні прийнято чотири державні космічні програми: перша Державна космічна програма (1993–1996) дала змогу зберегти науковий і виробничий потенціал космічної галузі, друга Загальнодержавна космічна програма (1998–2002) передбачала створення наземної космічної інфраструктури на основі наявних структур, модернізацію Центру контролю космічного простору, третя Загальнодержавна космічна програма (2003–2007) спрямована на виконання спеціальних цільових програм, четверта загальнодержавна цільова науково-технічна програма запланована на 2008–2012 роки. З розвитком космічної галузі пов'язане ефективне надходження та використання інформації з космічних носіїв для виконання завдань моніторингу в інтересах національної економіки, управління територіями, охорони довкілля, безпеки та оборони [1].

В останні десятиліття особливо ефективно використовують дистанційне зондування Землі для отримання додаткової інформації про земну поверхню та її надра. Особлива роль в сучасних технологіях обробки космічної інформації належить зніманню з космічних літальних апаратів, яке виконують різними за типом знімальними системами.

На передавальні характеристики знімальної системи впливають різні чинники, основними з яких є: турбулентність атмосфери, оптична система, зсув зображення, залишкове дефокусування, дифракція, дискретна будова фотоприймача.

Якість зображення оцінюють за розрізнявальною здатністю або функцією передавання модуляції [4, 6]. Остання має переваги, оскільки дає змогу окремо враховувати кожен із чинників. Вираз результативної функції передавання модуляції запишеться:

$$T_{\Sigma}(N) = K \cdot T_{тур}(N) \cdot T_{об}(N) \cdot T_{зс}(N) \cdot T_{деф}(N) \cdot T_{диф}(N) \cdot T_{фн}(N), \quad (1)$$

де  $K$  – контраст об'єктів;  $N$  – кількість ліній на міліметр;  $T_{тур}(N)$  – ФПМ турбулентності атмосфери;  $T_{об}(N)$  – ФПМ оптичної системи;  $T_{зс}(N)$  – ФПМ зсуву зображення;  $T_{деф}(N)$  – ФПМ залишкового дефокусування;  $T_{диф}(N)$  – ФПМ дифракції;  $T_{фн}(N)$  – ФПМ дискретного фотоприймача.

### Виклад основного матеріалу проблеми

Атмосфера істотно впливає на зображення, змінюючи яскравість та знижуючи його контраст.

Можна виділити два підходи до врахування впливу атмосфери: перший стосується розроблення математичної моделі впливу основних чинників, зокрема і атмосфери, на якість зображення, другий базується на врахуванні впливу атмосфери на стадії комп'ютерної обробки зображень. Розглянемо математичну основу цих підходів.

В останнє десятиліття для покращення зображень використовують підхід, який передбачає комп'ютерне опрацювання. В геоінформаційній системі ERDAS для врахування впливу атмосфери застосовують спеціальні модулі. Сучасні цифрові технології врахування впливу атмосфери як одного з найважливіших чинників спотворень зображень базуються на визначенні індексів, за допомогою яких формують нове зображення [2]. Принцип розрахунку індексів пов'язаний із отриманням попиксельних яскравостей для різних спектральних каналів. Найвживанішими є такі:

- індекс глобального моніторингу навколишнього середовища

$$GEMI = E(1 - 0,25E) - \frac{RED - 0,125}{1 - RED}, \quad (2)$$

де

$$E = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1,5NIR + 0,5RED}{NIR + RED + 0,5}, \quad (3)$$

- вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери

$$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}, \quad (4)$$

де  $Rb = RED - a(RED - BLUE)$ , як правило,  $a = 1$ ; за слабого покриття рослинності і невідомого типу атмосфери  $a = 0,5$ .

У сучасних технологіях обробки зображень домінуюча роль належить космічним зображенням високого розрізнення [1]. Супутники останніх років є носіями оптико-електронної апаратури з розрізненням 1 метр і меншим, ніж 1 метр. Потреби світового ринку зображень оцінюються так: 65 % – з розрізненням менш ніж 1 м; 25 % – 1 м; 7 % – 2–3 м; 3 % – понад 5 м.

Подальші розробки будуть спрямовані на дослідження ефективності обробки зображень за цією методикою.

Одержання залежності функції передавання модуляції від параметрів атмосфери та знімання базується на інтегральному принципі, основою якого є експериментні дані, які характеризують її стан. Стан атмосфери залежить від прозорості, що пов'язана із кількістю аерозолів, турбулентності (перемішування повітряних мас), товщини шару, погодних умов тощо.

У спеціальній літературі через складність експериментів отримання функції передавання модуляції впливу атмосфери наводять різні залежності без чітких рекомендаційних пояснень.

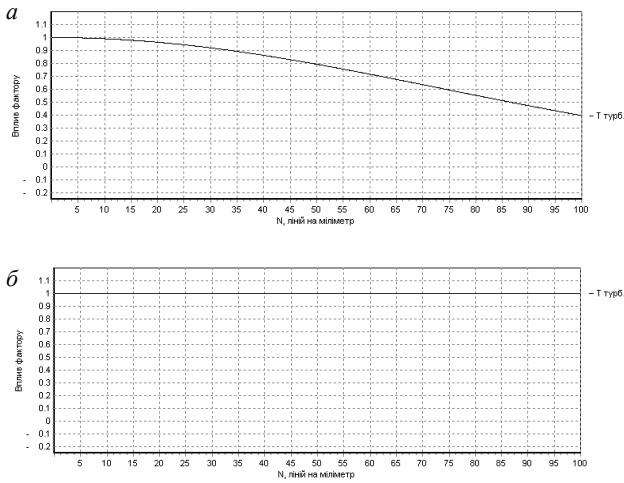


Рис. 1. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи SPOT-5:  
 а – при  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – при  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

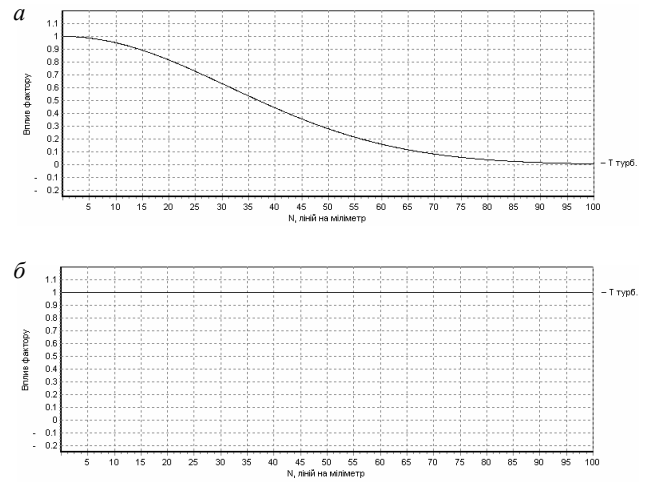


Рис. 4. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи QuickBird-2:  
 а – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

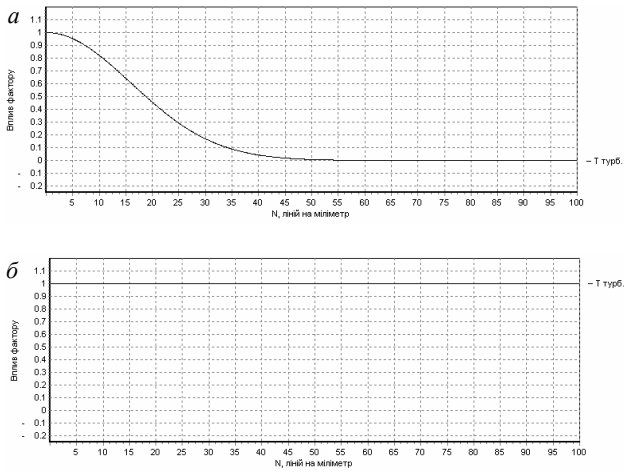


Рис. 2. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи Ikonos-2:  
 а – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

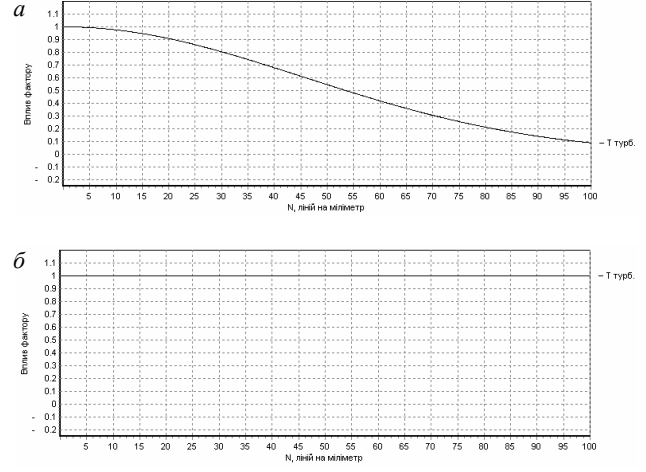


Рис. 5. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи Eros-A1:  
 а – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

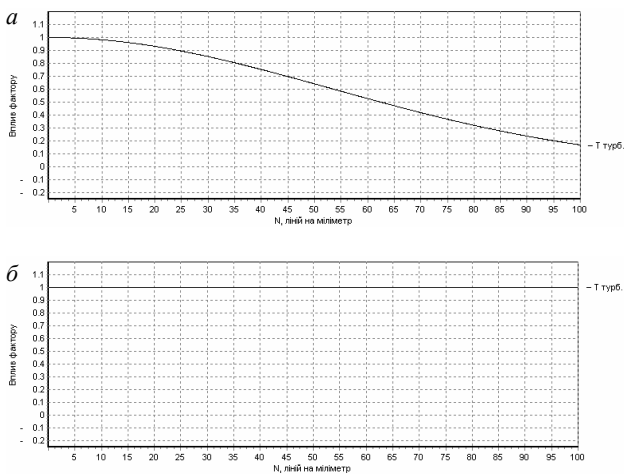


Рис. 3. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи OrbView-3:  
 а – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

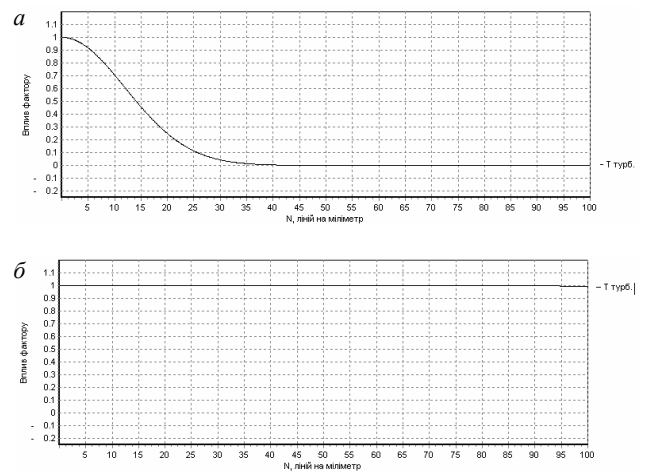


Рис. 6. Графік впливу турбулентності атмосфери для системи GeoEye-1:  
 а – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ ; б – якщо  $\sigma_T \approx 10^{-8}$

Ми використали формулу, наведену в монографії Х. Фризера [7], на яку посилаються в своїх монографіях А.С. Кучко [5] та А.Н. Живичин, В.С. Соколов [3]:

$$T_{myr}(N) \cong \exp(-2 \cdot \pi^2 \cdot \sigma_T^2 \cdot f_K^2 \cdot N^2), \quad (5)$$

де  $f_K$  – фокусна відстань об'єктива, мм.

Оскільки коефіцієнт  $\sigma_T$ , який характеризує турбулентність, враховують за статистичними даними, отриманими із експериментів, то в різних джерелах наводять різні коефіцієнти для врахування турбулентності. Інтегрально для дуже слабкої турбулентності  $\sigma_T \approx 10^{-8}$ , для атмосфери з різним ступенем турбулентності  $\sigma_T \approx 10^{-7}$ ,  $\sigma_T \approx 10^{-6}$ .

Одним із завдань дослідження було моделювання впливу параметрів турбулентності атмосфери та їх порівняльний аналіз.

Розглянемо функції передавання модуляції для зображень, отриманих із космічних літальних апаратів SPOT-5, Ikonos-2, OrbView-3, QuickBird-2, Eros-A1, GeoEye-1, характеристики яких подано в табл. 1.

Для врахування впливу атмосфери різних знімальних систем високого розрізнення, використовуючи вираз (5), за програмою на мові програмування Delphi здійснено моделювання для різного стану атмосфери. Результати обчислень ФПМ впливу атмосфери за різними моделями наведено на рис. 1–6.

Таблиця 1

**Характеристики знімальних систем**

| № | Назва супутника | Висота орбіти Н, км | Фокусна відстань f, м | Відн. отвір (f/d0) = 1/ | Піксел, мкм | Пр. піксела на місцевість, м |
|---|-----------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|------------------------------|
| 1 | SPOT-5          | 830                 | 2,164                 | 8                       | 6,5         | 2,5                          |
| 2 | Ikonos-2        | 681                 | 10,0                  | 14,285                  | 12,0        | 0,82                         |
| 3 | OrbView-3       | 430                 | 3,0                   | 6                       | 7,0         | 1,0                          |
| 4 | QuickBird-2     | 450                 | 5,08                  | 12,5                    | 6,9         | 0,61                         |
| 5 | Eros-A1         | 480                 | 3,5                   | 10                      | 13,0        | 1,8                          |
| 6 | GeoEye-1        | 684                 | 13,3                  | 12                      | 8,0         | 0,41                         |

Результативну функцію передавання модуляції (1) отримано за аналітичними виразами для часткових ФПМ, поданих в [1]. А результативну розрізнювальну здатність системи одержимо в перетині результативної функції передавання модуляції  $T(N)$ , обчисленої за виразом (1), з кривою порогової модуляції

Результати обчислень розрізнювальної здатності для наведених знімальних систем космічних літальних апаратів за значенням коефіцієнта контрастності об'єктів  $K=1$  та різних значень коефіцієнта, який враховує вплив турбулентності атмосфери, подано в табл. 2. Для визначення розрізнювальної здатності прийнято порогове значення модуляції передавальних функцій  $K_{пор} = 0,18$ .

Аналіз кривих ФПМ впливу атмосфери різних систем дає змогу зробити висновок, що стан атмосфери суттєво впливає на розрізнювальну здатність зображень. Наприклад, за сприятливих умов, для зоб-

раження зі знімальної системи SPOT-5, розрізнювальна здатність за дуже слабкої турбулентності  $\sigma_T \approx 10^{-8}$  становить  $97,6 \text{ мм}^{-1}$ , за значної турбулентності  $\sigma_T \approx 10^{-6}$  розрізнювальна здатність знижується до  $78,6 \text{ мм}^{-1}$ . Спостерігаємо значний вплив на зміну розрізнювальної здатності як параметрів самої знімальної системи, зокрема для знімальних систем із великими фокусними відстанями: Ikonos-2, QuickBird-2, GeoEye-1, так і умов знімання (турбулентності атмосфери).

Цей підхід важливий тим, що дає змогу виконувати порівняльний аналіз передавальних можливостей різних знімальних систем.

Таблиця 2

**Результативна розрізнювальна здатність системи**

| № з/п | Назва знімальної системи | Розрізнювальна здатність ( $\text{мм}^{-1}$ ) за різного значення $\sigma_T$ |                            |                            |
|-------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
|       |                          | $\sigma_T \approx 10^{-8}$   | $\sigma_T \approx 10^{-7}$ | $\sigma_T \approx 10^{-6}$ |
| 1     | SPOT-5                   | 97,6   | 97,4                       | 78,6                       |
| 2     | Ikonos-2                 | 54,1   | 53,2                       | 25,1                       |
| 3     | OrbView-3                | 100,8  | 100,3                      | 69,8                       |
| 4     | QuickBird-2              | 74,9   | 74,2                       | 44,5                       |
| 5     | Eros-A1                  | 56,5   | 56,4                       | 47,1                       |
| 6     | GeoEye-1                 | 72,5   | 68,9                       | 20,5                       |

**Висновки**

1. Розглянуто два підходи до врахування впливу атмосфери на передавальні характеристики аерокосмічних знімальних систем: перший стосується розроблення математичної моделі впливу основних чинників на якість зображення, другий базується на врахуванні впливу атмосфери на стадії комп'ютерної обробки зображень і передбачає отримання різнокальнійної інформації.

2. Виконано порівняльний аналіз математичних моделей функцій передавання модуляції за вплив атмосфери. Встановлено, що турбулентність значно знижує передавальні можливості зображень, однак інтегральні коефіцієнти, які характеризують вплив турбулентності, потребують додаткових досліджень.

**Література**

1. Бурштинська Х.В. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. / Х.В. Бурштинська, С.А. Станкевич. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010. – 292 с.
2. Кохан С.С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручн. / передм. Д.О. Мельничука / С.С. Кохан, А.Б. Востоков. – К.: Вища шк., 2009. – 511 с.
3. Живичин А.Н. Дешифрование фотограмметрических изображений / А.Н. Живичин, В.С. Соколов. – М.: Недра, 1980. – 254 с.
4. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособ. / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.

5. Кучко А.С. Аэрофотография и специальные фотографические исследования / А.С. Кучко. – М.: Недра, 1988. – 236 с.
6. Савиных В.П. Аэрокосмическая фотосъемка: учебник / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М.: Картогеоцентр. – Геодезиздат, 1997. – 378 с.
7. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: моногр. / Х. Фризер. – М.: Мир, 1978. – 670 с.

**До питання впливу атмосфери на передавальні характеристики космічних знімальних систем**

І. Долинська, Х. Бурштинська

Виконано порівняльний аналіз математичної моделі впливу атмосфери на передавальні характеристики космічних знімальних систем.

**К вопросу влияния атмосферы на передающие характеристики космических съемочных систем**  
И. Долинская, Х. Бурштинская

Проведен сравнительный анализ математической модели влияния атмосферы на передающие характеристики космических съемочных систем.

**To the question of atmospheric influence on transmission characteristics of satellite imaging systems**

I. Dolynska, H. Burshtynska

A comparative analysis of mathematical models of atmospheric influence on transmission characteristics of satellite imaging systems is presented.



**Видавництво Львівської політехніки  
пропонує**

**Бурштинська Х. В., Станкевич С. А.  
АЕРОКОСМІЧНІ ЗНІМАЛЬНІ СИСТЕМИ**

*Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки,  
2010. 292 с. Формат 170 x 240 мм. Тверда оправа.  
ISBN 978-966-553-951-3*

**Рекомендувало Міністерство освіти і науки України**

Розглянуто загальну модель дистанційного зондування Землі, основні типи космічних та авіаційних літальних апаратів, їх можливості та характеристики. Подано принципи формування зображень, структуру, конструктивні особливості, передавальні можливості та технічні характеристики фотографічних, оптико-електронних, оптико-механічних, інфрачервоних, лазерних, мікрохвильових радіометрів (радіотеплових) та радіолокаційних знімальних систем.

Охарактеризовано багатоспектральні та гіперспектральні знімальні системи. Розглянуто принципи побудови цифрових моделей рельєфу з використанням лазерних та радіолокаційних знімальних систем.

Книга буде корисною для студентів, аспірантів, науковців – фахівців у галузі дистанційного зондування Землі, геодезії, картографії, фотограмметрії та кадастру.

**Зміст**

*Вступ.*

1. Загальна модель дистанційного зондування Землі.
2. Лінійна просторово-частотна модель знімальних систем.
3. Знімальні системи з одночасною побудовою та записом (фотографічні).
4. Сенсори фотографічних знімальних систем.
5. Метрологія аерокосмічних зображень.
6. Знімальні системи з одночасною побудовою та неодноразовим записом (телевізійні та оптико-електронні).
7. Типи авіаційних та космічних оптико-електронних знімальних систем.
8. Знімальні системи з неодноразовою побудовою та неодноразовим записом (сканувальні).
9. Радіохвильові знімальні системи.

*Перспективні напрями розвитку аерокосмічних знімальних систем.*

*Список літератури.*

**Книги можна замовити за адресою: вул. Ф. Колесси, 2, корп. 23А, м. Львів, 79000  
тел. +38032 2582146, факс +38032 2582136, ел. пошта: [vmr@vlp.com.ua](mailto:vmr@vlp.com.ua), <http://vlp.com.ua>**