

О.Є. Горшенін, к.т.н., доц.,
І.В. Пулеко, к.т.н., доц.,
В.А. Миклуха

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

Методика прогнозування показників якості космічних оптико-електронних знімків видимого діапазону хвиль

У роботі розроблено методику прогнозування якості космічних оптико-електронних знімків видимого діапазону хвиль. Дана методика враховує показники, які впливають на кінцеву якість знімка, що значно підвищує інформативність отриманих знімків. Під час розробки методики проведено моделювання таких основних факторів, які впливають на якість космічних оптико-електронних знімків, як: величина потоку сонячного випромінювання; розсіювання та поглинання світла в атмосфері; відбиття від об'єктів на поверхні Землі; технічні характеристики самої оптико-електронної системи. Для реалізації методики розроблено програмний продукт, основними базовими елементами якого є математичні моделі елементів системи оптико-електронного космічного знімання.

Ключові слова: оптико-електронні системи; космічний апарат; оптичний діапазон спектру; космічне знімання; якість знімків; прогнозування якості.

Постановка проблеми. Задача оперативного космічного моніторингу природних ресурсів, дослідження динаміки протікання природних процесів та явищ, аналіз причин і прогнозування можливих наслідків та вибір методів попередження надзвичайних ситуацій на сучасному етапі є невід'ємним атрибутом методології збору інформації про стан території, необхідної для прийняття правильних та своєчасних управлінських рішень.

В наш час головна роль в реалізації космічного моніторингу належить знімкам, які виконуються оптико-електронними системами (ОЕС) в оптичному діапазоні спектру, так як вони дають максимум корисної інформації. Якість космічних знімків, що отримуються ОЕС залежить від багатьох факторів, таких як: пора року, час доби, стан атмосфери, технічних характеристик бортової апаратури та інших. Тому в процесі управління космічним апаратом здійснюється планування роботи бортової апаратури відповідно до отриманих від споживачів заявок. Однак до цього часу у процесі планування не враховуються комплексно всі показники, які впливають на кінцеву якість знімка, що інколи приводить до отримання знімків з низькою інформативністю. Тому розробка методики прогнозування показників якості космічного знімання, є **актуальною** науково-технічною задачею, що надасть можливість економити бортові ресурси та отримати значно більше корисної інформації з космічних знімків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Потрібно відмітити, що космічні знімки видимого діапазону використовуються вже не одне десятиліття для отримання інформації про Землю і тут досягнуті значні результати. Достатньо добре розвинені методи обробки [1–4], пророблена методика дешифрування знімків [5–7], критично оцінені можливої точності і надійності інформації [8–10], та розроблені моделі деяких окремих елементів оптико-електронних систем [8, 11–14].

Основний вклад у рішення проблем моделювання оптико-електронних систем внесли такі вчені, як Ю.К. Ребрин, А.Ф. Мельканович, М.А. Попов, В.Л. Моїсєєв, В.Е. Зуєв, М.В. Кабанов та інші.

Однак до цього часу при плануванні космічного знімання не враховуються у повній мірі такі фактори, як стан атмосфери, вплив відхилення оптичної осі на детальність і контрастність знімка. Тому **метою роботи** є покращення експонетричних розрахунків при плануванні космічного оптико-електронного знімання у видимому діапазоні.

Для досягнення цієї мети в роботі розроблено методику прогнозування якості космічних знімків видимого діапазону, в основу якого покладено математичне моделювання основних процесів, що впливають на якість знімків.

Постановка завдання. Практично для більшості видів оптико-електронних систем ще на стадії створення розроблювачем враховується взаємозалежність характеристик і процесів, що визначають весь канал функціонування ОЕС. У зазначеній системі співвідношення яскравостей спостережуваного об'єкта й навколишнього середовища або контраст об'єкта і його динаміка в часі враховується при визначенні конструктивних особливостей самої оптико-електронної системи. Контраст об'єкта погіршується за рахунок впливу атмосфери, що розділяє об'єкт знімання і об'єкти оптико-електронної системи.

Багато вимог, висунутих до багатозональної апаратури, призначеної для космічного знімання, є дуже суперечливими. Знімання у вузьких зонах спектра вимагає використання фотоприймачів з високою чутливістю, однак це вимагає відповідне збільшення площі елементарного фотоприймача, та/або

зменшення товщини світлочутливого шару, та/або використання накопичення енергії за рахунок переносу зарядів у матричних фотоприймачах. Збільшення площі чутливого елемента погіршує детальність одержуваних знімків. Зменшення товщини світлочутливого шару пов'язано з технологічними труднощами – вимагає надвисокої чистоти матеріалу. Використання накопичення переносом висуває підвищені вимоги до точності синхронізації переносу зарядів і руху космічного апарата (КА). Помилки цієї синхронізації погіршують роздільну здатність знімків. На етапі розробки ОЕС визначаються всі її характеристики, виходячи з максимального діапазону можливих значень параметрів зовнішніх факторів, що впливають на якість знімків.

В період експлуатації існує необхідність налаштування ОЕС на конкретні умови знімання. Це вимагає уточнення параметрів атмосфери, врахування пори року, характеристик освітлення та особливостей підстилаючої поверхні, що підлягає зніманню. Неврахування цих факторів може привести до зниження якості отриманих знімків. Тому, для проведення оперативних розрахунків на конкретний час проведення знімання доцільно розробити методику прогнозування якості космічних оптико-електронних знімків видимого діапазону хвиль при довільно заданих налаштуваннях обладнання. Це завдання має бути реалізовано за допомогою математичного моделювання процесів в елементах ОЕС та об'єднання їх у єдину систему.

Виклад основного матеріалу дослідження. Коротко процес оптико-електронного знімання можна описати у такий спосіб. Ділянка поверхні Землі освітлюється сонячним світлом, яке проходить через атмосферу де відбуваються процеси розсіювання поглинання та відбиття (рис. 1). Енергія відбитого від поверхні Землі (ЗП) сонячного випромінювання знову проходить через атмосферу і фіксується оптико-електронною системою КА.

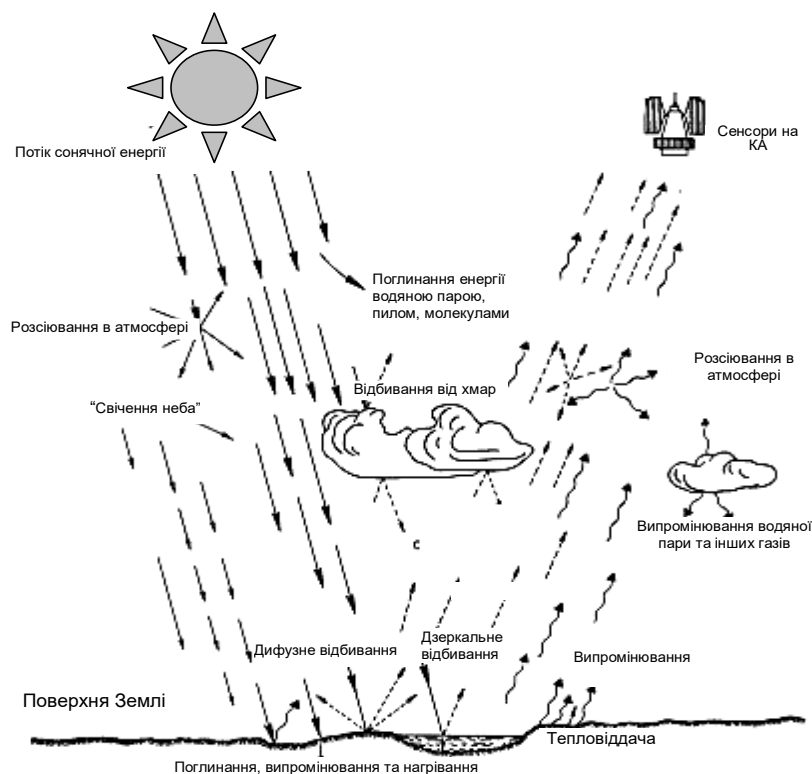


Рис. 1. Схема процесів відбиття, розсіювання та поглинання енергії в атмосфері та на поверхні Землі

У сучасних ОЕС використовують формувачі відеосигналів на приладах з зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Процес формування зображення в ПЗЗ складається із трьох основних етапів: поглинання світла на фоточутливих елементах (фотодетекторах) лінійок або матриць ПЗЗ; збирання електронних носіїв у елементах матриці; опитування матриці синхронно в растрі розгорнення й формування вихідного сигналу зображення. У такому типі знімальної системи багато тисяч детекторів світла утворюють ряди («лінійки»), орієнтовані перпендикулярно напрямку польоту КА. Для кожного спектрального каналу призначається один ряд детекторів (лінійка). Ряди приймачів випромінювання розташовуються у фокальній площині оптичної системи, що проектує на них зображення ЗП (рис. 2). Поступальний рух КА забезпечує розгорнення зображення по повздовжній осі.

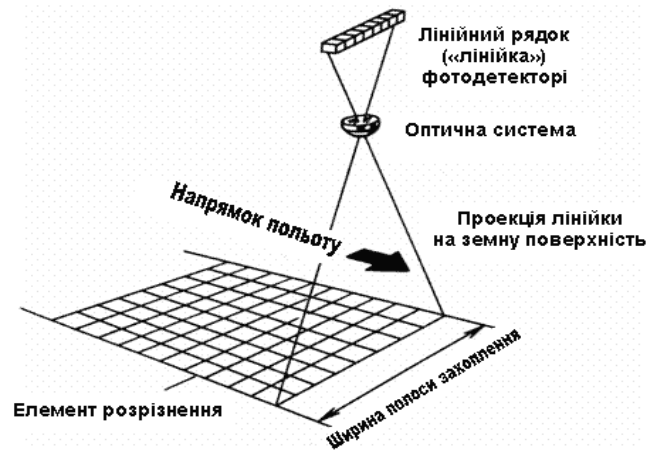


Рис. 2. Принцип проектування зображення Земної поверхні на лінійку ПЗЗ – фотоприймачів

Основними фізичними факторами, що підлягають моделюванню будуть: величина потоку сонячного випромінювання; розсіювання, поглинання світла у атмосфері; відбиття від об'єктів на поверхні Землі; технічні характеристики самої ОЕС. За модельний об'єкт на ЗП приймається масив однакових, регулярно розташованих елементів (пікселів) еталонного зображення у вигляді масиву коефіцієнтів відбиття від заданих матеріалів об'єкта ЗП ρ_{ij} . При цьому вважається, що об'єкт розташований на фоні з такого ж самого матеріалу. Це відповідає найгіршому випадку: коли контрасти, що окреслюють форму об'єкта, формуються тільки розбіжностями у освітленні різних сторін об'єкта (контраст «освітлення Сонцем – тінь»). Вважається також, що розмір найменшого елемента еталонного об'єкта дорівнює приведеній деталістості знімальної ОЕС при зніманні в надир з проектної висоти орбіти КА.

Принципово методика розроблялась для датчика МСУ-8 КА космічної системи «Січ-2». Теоретична найкраща приведена деталістості знімків цього датчика складає 7,8 м при зніманні в надир. Турбулентна атмосфера приводить до розмиття меж об'єктів на космічних знімках в межах 0,15–0,8 м. Це невелике значення порівняно з теоретичною приведеною деталістю знімків МСУ-8, що дозволяє відмовитись від моделювання впливу турбулентності атмосфери у даному випадку. Розмірами каустики об'єктиву також можна знехтувати, покладаючись на конструкторський запас.

Форма еталонного об'єкта може бути різною, але для оцінювання втрат деталістості знімка при відворотах оптичної осі, доцільно обрати еталонний об'єкт у вигляді радіальної міри. У такому випадку світлі ланки міри відповідають ланкам ЗП, що освітлені прямими сонячними променями, а темні ланки міри відповідають ланкам ЗП, що освітлені небосхилом і окремими хмарами. Матеріал такого об'єкта – міри приймають однаковим: $\rho_{ij} = \text{const}$.

За показники якості знімків, як правило, приймають [2, 8]: контраст, деталістості (або приведену деталістості), наявність радіометричних викривлень (у простішому випадку – надмірного засвітлення та затемнення об'єктів) і кількість шумів.

Методику прогнозування якості космічних оптико-електронних знімків видимого діапазону хвиль подамо у вигляді покрокових дій.

Для початку розрахунків освітлених ланок земної поверхні потрібно визначити довготу, широту об'єкта знімання (відповідно до заявки на знімання). За допомогою програми «Orbitron» за заданими орбітальними параметрами КА здійснюється розрахунок місцевої дати та часу знімання, кута піднесення Сонця h_c , кута напрямку з об'єкта на КА φ , висоти КА над поверхнею Землі $H_{КА}$ на обраний час знімання.

На кроці 1 виконується збір початкових параметрів: кута піднесення Сонця h_c , стану хмарності, вологості атмосфери в районі знімання ω [мм/км] (по даним метеопрогнозу), типу поверхні, висоти КА $H_{КА}$ [км], фокусної відстані f [мм], кута напрямку на КА φ [град], H_{nCCD} – експозиції еквівалентної середньоквадратичному значенню шуму лінійки [Дж/м], $\Delta x, \Delta y$ – розмірів елементів ПЗЗ – лінійки [мкм], R_Q – коефіцієнту перетворення енергії випромінювання в електрони [електрон/Дж], K_A – коефіцієнту перетворення електронів в напругу [В/електрон], K_U – коефіцієнту посилення посилювача сигналів ПЗЗ – лінійки, T_U – температури при якій працює підсилювач [град], R_{equ} – еквівалентного вхідного опору підсилювача [Ом], N_{EL} – сумарної кількості елементів ПЗЗ – лінійки, формуючих один рядок зображення, еталонного зображення в вигляді масиву коефіцієнтів відбиття від ЗП ρ_{ij} .

На кроці 2 виконується розрахунок шляху проходження в атмосфері променів Сонця l :

$$l = \text{tg } h_c * H_{\text{атм}}; \quad (1)$$

Прийнято $H_{\text{атм}} = 100$ км.

На кроці 3 виконується розрахунок вибіркового поглинання водяними парами усередині вікон прозорості атмосфери за формулою:

$$\tau_{\Pi} = t_0 - p_0 \lg(\omega); \quad (2)$$

де w – приведена товщина водяних парів у міліметрах на 1 км шляху;

t_0 і p_0 – постійні. Для видимого діапазону $p_0, \% = 15,1$ та $t_0, \% = 106$.

На кроці 4 виконується розрахунок коефіцієнт перепускання чистої атмосфери, обумовлений розсіюванням на молекулах:

$$\tau_p(H_i) = \exp\left(-\frac{1}{\lambda^4} \cdot \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N(H_i)} \cdot \frac{l}{k}\right); \quad (3)$$

де k – це кількість шарів на яку розбито атмосферу. Загальний коефіцієнт перепускання розраховується накопиченням по k – шарам.

$$\tau_p = \prod_{i=0, k-1} \tau_p \cdot \tau_p(H_i); \quad (4)$$

На кроці 5 виконується розрахунок загального коефіцієнту пропускання атмосфери для видимого діапазону за формулою:

$$\tau = \tau_p * \tau_{\Pi}; \quad (5)$$

На кроці 6 виконується розрахунок прямої освітленості у видимому діапазоні хвиль за формулою:

$$E_{\Pi} = E_0 \tau^{(\sec(90-h_c))} \cos(90 - h_c), \quad (6)$$

де E_0 – освітленість, створювана Сонцем за межами атмосфери («космічна» освітленість). Її величина дорівнює у середньому 134 000 лк.

На кроці 7 за станом хмарності в районі знімання з таблиці 1 визначається освітленість земної поверхні небосхилом і хмарами $E_{\sim} = E_c + E_p$ (в тис. лк) в залежності від висоти Сонця над горизонтом $h_c, ^\circ$.

Таблиця 1

$h_c, ^\circ$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
висококупчасті хмари	2	9	18	25	32	41	50	59	68	74	80
не велика щільність хмар	3	10	17	27	32	40	48	56	65	72	78
безхмарне небо в тіні	3	4	6	9	12	13	13	14	15	16	15

Маємо оціночні значення прямого E_{Π} та розсіяного освітлень E_{\sim} в районі знімання. Далі розраховується відбите випромінювання.

На кроці 8 отримується коефіцієнт відбиття ρ в залежності від заданого в заявці матеріалу поверхні (табл. 2).

Таблиця 2

Об'єкт	ρ	Об'єкт	ρ
Луг зелений	0,06	Сніг що тоне	0,80
Луг жовтий, випалений	0,14	Сніжне поле з рідкими чагарниками	0,60
Степ жовтий сухий	0,10	Лід річковий	0,35
Посів зелений	0,05	Шосе сухе	0,32
Жнива	0,10	Шосе мокре	0,11
Ліс хвойний	0,04	Булизна мостова суха	0,20
Ліс листовий літом	0,05	Булизна мостова мокра	0,09
Ліс листовий осінню	0,15	Дорога ґрунтова на піску суха	0,20
Ліс листовий зимою	0,07	Цегла червона	0,20
Пісок білий сухий	0,20	Вапно світле	0,40
Пісок мокрий	0,08	Плита бутова	0,35
Пісок жовтий сухий	0,15	Стіна біла свіжа	0,90
Ґрунт супісчаний сухий	0,13	Стіна біла несвіжа	0,70
Ґрунт супісчаний мокрий	0,06	Щебінь гранітний	0,17
Ґрунт суглинний сухий	0,15	Дошки свіжі соснові	0,50
Чорнозем сухий	0,03	Дошки старі	0,14
Чорнозем мокрий	0,02	Стіна з колод	0,20
Море	0,07	Солома	0,15
Сніг який щойно випав	1,00	Дах залізний червоний	0,13
Сніг середньої свіжості	0,90	Дах дерев'яний	0,15

На кроці 9 виконується розрахунок кута зору елементарного фотоприймача за формулою:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\Delta x}{2f}\right); \quad (7)$$

На кроці 10 виконується розрахунок проекції поля зору елементарного фотоприймача на ЗП Δx за формулою:

$$\Delta x = H_{КА}(\operatorname{ctg}(90 - \varphi + \beta) - \operatorname{ctg}(90 - \varphi - \beta)); \quad (8)$$

φ – кут місця напрямку відбиття на КА; $H_{КА}$ – висота КА.

На кроці 11 виконується розрахунок площі проекції елементарного фотоприймача (ФП) лінійки ПЗЗ на ЗП за формулою:

$$S = \Delta x^2; \quad (9)$$

Для спрощення розрахунків вважається, що проекція елемента ФП на ЗП однакова в обох напрямках.

На кроці 12 виконується розрахунок потоку відбиття для прямого освітлення Сонцем за формулою:

$$\Phi_{\text{від1}} = E_n \cdot \rho_{ij} \cdot S \cdot \cos h_c \cdot \cos \varphi; \quad (10)$$

На кроці 13 виконується розрахунок потоку відбиття для розсіяного небосхилом освітлення за формулою:

$$\Phi_{\text{від2}} = (E_p + E_c) \cdot \rho_{ij} \cdot S \cdot \cos \varphi; \quad (11)$$

На кроці 14 знаходиться відбитий сумарний світловий потік для освітленого Сонцем елемента ЗП:

$$\Phi_{\text{від осв}} = \Phi_{\text{від1}} + \Phi_{\text{від2}}; \quad (12)$$

Відбитий світловий потік для такого ж об'єкта на ЗП в тіні:

$$\Phi_{\text{від тіні}} = \Phi_{\text{від2}}; \quad (13)$$

Далі розраховуються потоки на вхідному отворі об'єктиву.

На кроці 15 виконується розрахунок відстані, що проходять відбиті промені в атмосфері за формулою:

$$l_1 = tg \varphi * H_{\text{атм}}; \quad (14)$$

На кроці 16 виконується розрахунок коефіцієнта послаблення випромінювання за рахунок розсіювання за формулою:

$$\tau_{p1}(H_i) = \exp\left(-\frac{1}{\lambda^4} \cdot \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N(H_i)} \cdot \frac{l_1}{k}\right); \quad (15)$$

де k – це кількість шарів на яку розбито атмосферу. Кожний шар має свою щільність та, відповідно свій коефіцієнт перепускання. Загальний коефіцієнт перепускання розраховується накопиченням по k – шарам. При практичних розрахунках достатньо 10 шарі

$$\tau_{p1} = \prod_{i=0, k-1} \tau_{p1} \cdot \tau_{p1}(H_i); \quad (16)$$

На кроці 17 виконується розрахунок загального коефіцієнта послаблення випромінювання на шляху від елемента ЗП до об'єктива за формулою:

$$\tau_1 = \tau_{p1} * \tau_n; \quad (17)$$

В роботі τ_n береться для нормального стану атмосфери: $\tau_n=0,75$.

Такий підхід оправданий, оскільки вважаємо, що хмари і серпанок не заважають видимості об'єкту.

На кроці 18 виконується розрахунок потоку розсіяного випромінювання від атмосфери на об'єктиві за формулою:

$$\Phi_p = E_p * S; \quad (18)$$

Значення E_p береться з таблиці 1 для безхмарного неба.

На кроці 19 виконується розрахунок сумарного світлового потоку, що приходить на об'єктив:

1) від освітленого елемента:

$$\Phi_{\text{осв}} = \Phi_{\text{від осв}} + \Phi_p; \quad (19)$$

2) від не освітленого сонячними променями світловий потік $\Phi_{\text{тіні}}$:

$$\Phi_{\text{тіні}} = \Phi_{\text{від тіні}} + \Phi_p; \quad (20)$$

Далі розраховується проходження через об'єктив.

На кроці 20 виконується розрахунок світлового потоку від освітленого Сонцем об'єкта та світловий потік від об'єкта в тіні Φ_1, Φ_2 у фокальній площині об'єктива:

$$\Phi_1 = (\Phi_{\text{осв}}) \cdot \tau_{\text{об}}; \quad (21)$$

$$\Phi_2 = (\Phi_{\text{тінь}}) \cdot \tau_{\text{об}}; \quad (22)$$

На кроці 21 виконується розрахунок потоку $\Phi_{А,Б}$ з каналів А і Б спектроподільного блоку (рис. 3) відповідно для освітленого і тіньового елементів:

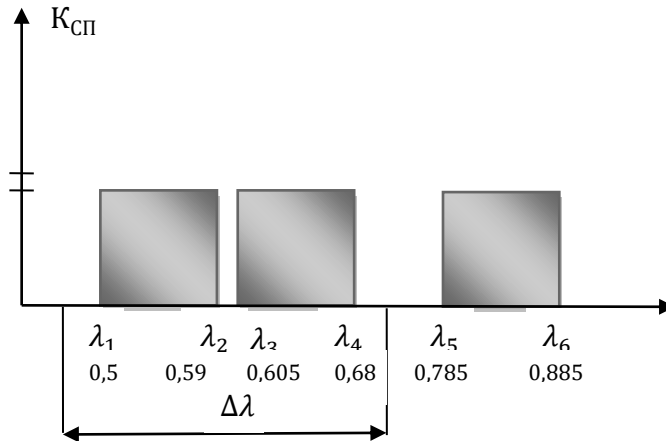


Рис. 3. Розподіл випромінювання в спектроподільному блоці датчика МСУ-8.

$$\Phi_{A1} = \Phi_1 * \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\lambda} * \tau_{AB}; \quad (23)$$

$$\Phi_{B1} = \Phi_1 * \frac{\lambda_4 - \lambda_3}{\Delta\lambda} * \tau_{AB}; \quad (24)$$

$$\Phi_{A2} = \Phi_2 * \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\lambda} * \tau_{AB}; \quad (25)$$

$$\Phi_{B2} = \Phi_2 * \frac{\lambda_4 - \lambda_3}{\Delta\lambda} * \tau_{AB}; \quad (26)$$

На кроці 22 виконується розрахунок напруг, що відповідають більш освітленому елементу ЗП:

$$u_{A1} = \Phi_{A1} * S_u; \quad (27)$$

$$u_{B1} = \Phi_{B1} * S_u; \quad (28)$$

та менш освітленому:

$$u_{B2} = \Phi_{B2} * S_u; \quad (30)$$

$$u_{A2} = \Phi_{A2} * S_u; \quad (29)$$

Далі розраховується напруга з виходу ФП.

На кроці 23 виконується розрахунок напруги на виході посилювача, що відповідає середньоквадратичному значенню теплового шуму фотоприймача:

$$u_n = H_{nCCD} * \Delta x * \Delta y * R_Q * K_A * K_U; \quad (31)$$

На кроці 24 виконується розрахунок напруга на виході, що відповідає середньоквадратичному значенню власного шуму посилювача:

$$u_{nAMP} = \sqrt{4 * k_B * T_U * N_{EL} * R_{equ} * \nu_x}; \quad (32)$$

На кроці 25 виконується розрахунок загальної напруги шуму:

$$u_{ш} = u_{nAMP} + u_n; \quad (33)$$

На кроці 26 виконується моделювання зашумлення. Формується випадкове значення напруги шуму з середнє квадратичним відхиленням $u_{ш}$ та математичним сподіванням 0 для кожного пікселя модельного зображення. Закон розподілу випадкової величини – Гаусівський.

$$U_{ш1} = Gauss(0, u_{ш}); \quad (34)$$

$$U_{ш2} = Gauss(0, u_{ш}); \quad (35)$$

$$U_{ш3} = Gauss(0, u_{ш}); \quad (36)$$

$$U_{ш4} = Gauss(0, u_{ш}); \quad (37)$$

Далі розраховується напруги з підсилювача з урахуванням шуму.

На кроці 27 виконується розрахунок напруги підсилювача з урахуванням шуму для освітленого елемента на ЗП:

$$u_{A1ш} = U_{A1} + U_{ш1}; \quad (38)$$

$$u_{B1ш} = U_{B1} + U_{ш2}; \quad (39)$$

для тінювого елемента на ЗП:

$$u_{A2ш} = U_{A2} + U_{ш3}; \quad (40)$$

$$u_{B2ш} = U_{B2} + U_{ш4}; \quad (41)$$

Далі відбувається моделювання АЦП. Радіометричні викривлення в лінійках ПЗЗ характеризуються рівнем нечутливості (рівень чорного) та рівнем насичення (рівень білого). Фактично на датчику МСУ – 8 рівень білого характеризується подвійним значенням – представником старшого (11) розряду АЦП. Він підбирається коефіцієнтом підсилення підсилювача уставками з таблиці фіксованих значень. Рівень чорного визначається як встановлене максимальне значення сигналу рівня білого поділене на 2^{11} і є ціною молодшого розряду.

На кроці 28 виконується розрахунок коду з АЦП, $F_{A1}(ij)$, $F_{B1}(ij)$, $F_{A2}(ij)$, $F_{B2}(ij)$.

Для моделювання рівномірно по шкалі АЦП можна використовувати прийом перетворення подання значення напруги з числом плаваючою крапкою в ціле число з відсіканням розрядів крапки. Ціна молодшого розряду повинна дорівнювати кроку квантування АЦП.

$$\Delta u = \frac{U_{CCDmax} \cdot K_u}{2^{11}} = \frac{3 \cdot K_u}{2^{11}}; \quad (42)$$

На кроці 28 оцінюються показники якості

Детальністю (розділення ОЕС на місцевості) d є характеристика ОЕС космічного знімання, яка визначається шириною чорної та білої смуги такого елемента розташованої на місцевості міри, зображення якого на знімку ще може бути дешифровано. Детальність характеризує роздільну здатність системи, приведену до місцевості. Вона визначається по відношенню:

$$d = \frac{D}{1/m}; \quad (43)$$

або

$$d = \frac{1}{2 \cdot R \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{1}{m}\right)}; \quad (44)$$

де $\frac{1}{m}$ – масштаб зображення; R – роздільна здатність, [4].

Важливим є також поняття приведеної детальності d^* , яке визначається числом пар чорно-білих ліній розташованих на місцевості міри. Приведена детальність визначає роздільну здатність ОЕС, яка приведена до місцевості:

$$d^* = \frac{1}{2 \cdot R \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{1}{m}\right)}. \quad (45)$$

Для перевірки працездатності та оцінки ефективності методики прогнозування якості космічних знімків видимого діапазону було розроблене програмне забезпечення розрахунку показників якості космічних знімків за допомогою мови програмування високого рівня.

На рисунку 4 подано приклад розрахунку та подання результатів прогнозування якості зображення. На рисунку 5 показано приклад визначення прогнозованої детальності зображення по радіальній мірі.

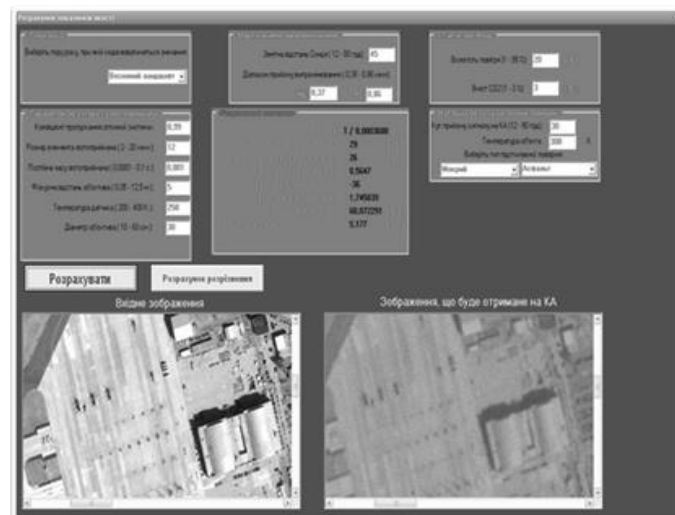


Рис. 4. Приклад розрахунку та подання результатів прогнозування якості зображення

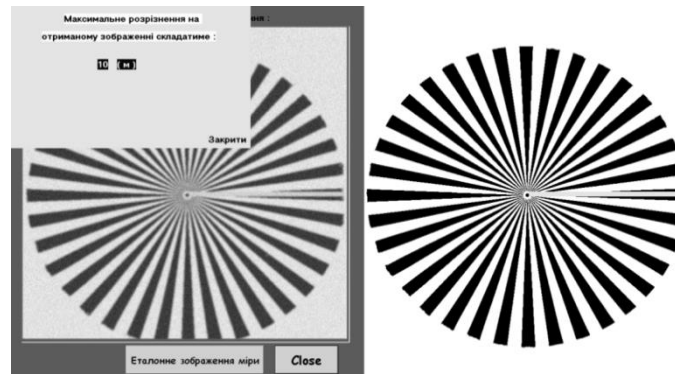


Рис. 5. Приклад визначення прогнозованої розрізняльної здатності зображення по радіальній мірі

Перевірка моделей та працездатності методики прогнозування здійснювалася шляхом прогнозування показників якості знімків датчика МСУ-8 КА «Січ-2» та порівняння з показниками реально отриманих знімків. Статистично визначена розбіжність показників не перевищувала 7 %.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень. У розробленій методиці застосовані математичні моделі складових елементів роботи оптико-електронних систем космічного знімання, що включають: модель освітлення, модель об'єкта, модель проходження випромінювання крізь атмосферу після відбиття від об'єкта, модель об'єктиву ОЕС, модель спектроподільного блоку, модель фотоприймача ОЕС та модель АЦП.

Розроблену методику доцільно використовувати у Центрі оперативного планування роботи космічних апаратів систем «Січ».

В подальшому планується розробити більш точну модель ОЕС, яка б враховувала геометричні особливості знімання конкретним датчиком, вплив турбулентної атмосфери та аберацій об'єктиву на детальність знімків та особливості спектральних характеристик відбиття від об'єктів та проходження променів крізь атмосферу.

Список використаної літератури:

1. Гонзалес Р. Цифровая обработка изображений / Р.Гонзалес, Р.Вуд. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Претт С.В. Цифровая обработка изображений : пер.с англ. / С.В. Претт. – М. : Мир, 1982. – 312 с.
3. Лурье И.К. Теория и практика цифровой обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / И.К. Лурье, А.Г. Косиков ; под ред. А.М. Берлянта. – М. : Научный мир, 2003. – 168 с.
4. Горшенін О.Є. Цифрова обробка зображень та основи фотограмметрії : навч. посібник / О.Є. Горшенін, О.Ф. Дубина, С.О. Кондратенко, С.І. Болобан. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 320 с.
5. Лабутіна І.А. Дешифрування аерокосмічних знімків : навч. посібник / І.А. Лабутіна. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
6. Болобан С.І. Дешифрування аерокосмічних знімків. Ч. 1 : навч. посібник / С.І. Болобан, О.Є. Горшенін. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2009. – 292 с.
7. Попов М.А. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование. Ч. 1 / М.А. Попов, В.Л. Мусеев. – Киев : КВВАИУ, 1990. – 223 с.
8. Основи побудови комплексів космічної видової розвідки / О.Є. Горшенін, С.О. Кондратенко, О.Ф. Дубина, П.П. Топольницький ; за ред. О.Є. Горшеніна. – Житомир, 2007. – 338 с.
9. Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – М. : Сов. радио, 1977. – 368 с.
10. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов / Ю.К. Ребрин. – К. : КВАИУ, 1988. – 450 с.
11. Формозов Б.Н. Аерокосмічні фотоприйомні прилади видимого та інфрачервоного діапазонів : уч. посібник / Б.Н. Формозов. – 2-ге вид, переробл. і доп. – СПб. ГУАПБГТУ «Военмех», 2004. – 127с.
12. Технічні засоби видової розвідки / А.В. Варламов, Г.А. Кириленко, А.А. Хорєв, А.Н. Федоринов ; за ред. А.А. Хорєва. – М. : РВСН, 1997. – 327 с.
13. Мельканович А.Ф. Фотографические средства и их эксплуатация / А.Ф. Мельканович. – М. : Воениздат, 1984. – 576 с.

References:

1. Gonzales, R. and Vud, R. (2005), *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy*, Tekhnosfera, M., 1072 p.
2. Prett, C.V. (1982), *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy*, translate by English, Mir, M., 312 p.
3. Lur'e, I.K. and Kosikov, A.G. (2003), *Teoriya i praktika tsifrovoy obrabotki izobrazheniy. Distantionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy*, in Berlyanta, A.M. (ed.), Nauchnyy mir, M., 168 p.
4. Gorshenin, O.Je., Dubyna, O.F., Kondratenko, S.O. and Boloban, S.I. (2008), *Cyfrova obrobka zobrazhen' ta osnovy fotogrametrii'. Navchal'nyj posibnyk*, ZhVI NAU, Zhytomyr, 320 p.

5. Labutina, I.A. (2004), *Deshyfruvannja aerokosmichnyh znimkiv*, navch. Posibnyk, Aspekt Press, M., 184 p.
6. Boloban, S.I. and Gorshenin, O.Je. (2009), *Deshyfruvannja aerokosmichnyh znimkiv*, P. 1, navch. posibnyk, ZhVI NAU, Zhytomyr, 292 p.
7. Popov, M.A. and Moiseev, V.L. (1990), *Fotogrammetricheskaya obrabotka i deshifrirovanie*, P. 1, KVVAIU, Kiev, 223 p.
8. Gorshenin, O.Je., Kondratenko, S.O., Dubyna, O.F. and Topol'nyč'ky, P.P. (2007), *Osnovy pobudovy kompleksiv kosmichnoi' vydovoi' rozvidky*, in Gorshenina, O.Je. (ed.), Zhytomyr, 338 p.
9. Zuev, V.E. and Kabanov, M.V. (1977), *Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosfere (v usloviyakh pomekh)*, Sov.radio, M., 368 p.
10. Rebrin, Yu.K. (1988), *Optiko-elektronnoe razvedyvatel'noe oborudovanie letatel'nykh apparatov*, KVAIU, K., 450 p.
11. Formozov, B.N. (2004), *Aerokosmichni fotopryjomni prylady vydymogo ta infrachervonogo diapazoniv*, uch. posibnyk, 2nd, pererobl. i dop., SPb. GUAPBGU «Vojenmeh», 127p.
12. Varlamov, A.V., Kyrylenko, G.A., Horjev, A.A. and Fedorynov, A.N. (1997), *Tehnichni zasoby vydovoi' rozvidky*, in Horjeva, A.A. (ed.), RVSU, M., 327 p.
13. Mel'kanovich, A.F. (1984), *Fotograficheskie sredstva i ikh ekspluatatsiya*, uchebnyk, Voenizdat, M., 576 p.

Горшенін Олександр Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри космічної розвідки Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- обробка зображень;
- складні технічні системи.

Тел.: (097) 384–27–23.

Пулеко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри космічної розвідки Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи;
- моделювання складних ієрархічних систем;
- управління в складних технічних системах.

Тел.: (067) 225–53–29.

Миклуха Василь Анатолійович – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- управління в складних технічних системах;
- робототехнічні системи;
- безпілотні авіаційні комплекси.

Тел.: (097) 285–23–54.

E-mail: profa2014@i.ua.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2018.