



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 2 • 2017 С. 95 – 99

Методична стаття

УДК 528.855+835

Післястартове радіометричне калібрування оптико-електронних сенсорів космічного спостереження Землі за диференціальним методом з врахуванням коефіцієнта пропускання атмосфери

Я.І. Зєлик*, С.В. Чорний, Л.В. Підгородецька

Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України, 03680, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 40, корпус 4/1

Розглянуто розроблену методику післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів космічного спостереження Землі, новизна якої полягає у реалізації диференціального методу врахування спектрального коефіцієнта відбиття тестових об'єктів за наземними вимірюваннями та у використанні коефіцієнта пропускання атмосфери, отриманого за даними світової мережі AERONET.

Ключові слова: післястартове радіометричне калібрування; оптико-електронний сенсор; калібрувальний полігон; тестовий об'єкт; спектральний коефіцієнт відбиття; спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; AERONET.

У межах реалізації Загальнодержавних цільових науково-технічних космічних програм України в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України виконано цикл робіт з розроблення науково обґрунтованих методик післястартового калібрування оптико-електронних сенсорів космічного спостереження Землі, як перехресного, за даними еталонних знімків існуючих систем ДЗЗ, так і з використанням контрольних-калібрувальних полігонів на основі наземних даних з врахуванням впливу атмосфери [1–14].

1. МЕТОДИКА ПІСЛЯСТАРТОВОГО РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ЗА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ МЕТОДОМ З ВРАХУВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ПРОПУСКАННЯ АТМОСФЕРИ

У статті розглядається запропонована методика радіометричного калібрування, новизна якої полягає у реалізації диференціального методу врахування спектрального коефіцієнта відбиття тестових об'єктів за наземними вимірюваннями та у використанні коефіцієнта пропускання атмосфери, отриманого за даними світової мережі AERONET [15].

Завдання радіометричного калібрування оптико-електронного сенсора на стадії польоту полягає в оцінюванні характеристик лінійної регресійної залежності цифрового значення яскравості пікселя DN на виході сенсора від спектральної енергетичної яскравості L на апертурі сенсора на верхній межі атмосфери (Top of Atmosphere — TOA)

Для реалізації власне радіометричного калібрування вважаються заданими такі параметри:

- спектральна енергетична опроміненість E_E поверхні тестового об'єкта (попередньо розраховується);
- спектральна оптична товща атмосфери над тестовим об'єктом τ (попередньо отримується за даними атмосферних вимірювань);
- спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери ρ , який виражається через спектральну оптичну товщу атмосфери τ функціональною залежністю $\rho = f(\tau)$;
- спектральні коефіцієнти відбиття поверхні в контрольних точках r_i (попередньо отримуються за даними наземних спектрометричних вимірювань);
- цифрові значення яскравості пікселя поверхні Землі у контрольних точках на космічному знімку DN_i .

Математична модель сенсора у кожному спектральному діапазоні може бути подана у такому вигляді:

$$DN_i = k[\rho E_E r_i + E_A] + b, \quad (1)$$

де k — коефіцієнт нахилу калібрувальної характеристики; b — постійна складова сигналу, зумовлена властивостями апаратури сенсора; E_A — яскравість атмосфери, зумовлена розсіюванням світла. Тоді для двох різних контрольних точок (тестових об'єктів, ТО), які мають номери i та j , на основі (1) можна записати:

$$DN_i - DN_j = k[\rho E_E (r_i - r_j)]. \quad (2)$$

* Зєлик Ярема Ігорович; ✉ adapt09@gmail.com

Рівняння (2) дає можливість визначити коефіцієнт нахилу калібрувальної характеристики сенсора таким чином:

$$k_{ij} = \frac{DN_i - DN_j}{\rho E_E (r_i - r_j)}, \quad r_i - r_j \neq 0, \quad (3)$$

$$\hat{k} = \frac{1}{\frac{n^2}{2} - n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n k_{ij}, \quad k_{ij} > 0, \quad (4)$$

де \hat{k} — оцінка коефіцієнта нахилу калібрувальної характеристики k , отримана за співвідношеннями (3) і (4) за умов $r_i - r_j \neq 0$; $k_{ij} > 0$.

Реалізація методики радіометричного калібрування за диференціальним методом здійснювалась при трьох способах знаходження величини опромінюваності E_E поверхні тестового об'єкта:

- 1) отримання з даних E_E з мережі AERONET [15] з інтерполяцією ділянок спектру, де дані AERONET відсутні;
- 2) розрахунок E_E за формулою Планка [5–7, 9];
- 3) розрахунок E_E за даними міжнародної моделі сонячного випромінювання ASTM E490-2000 [16].

Крім оцінки коефіцієнта нахилу калібрувальної характеристики як математичного сподівання за формулою (4), оцінка \hat{k} отримувалась як медіана та мода сукупності значень k_{ij} ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$).

Коефіцієнт пропускання атмосфери обчислюється за законом Бугера [17]

$$\rho = e^{-\tau}, \quad (5)$$

де спектральна оптична товща атмосфери над тестовим об'єктом τ отримується за даними атмосферних вимірювань у мережі AERONET [15].

Таким чином, з використанням результатів розрахунків та даних вимірювань на основі рівнянь (3)–(5) можна обчислити коефіцієнт нахилу калібрувальної характеристики сенсора.

Постійна складова сигналу b у рівнянні (1), зумовлена властивостями апаратури сенсора, може бути обчислена за знімком у темряві, коли $E_E = E_A = 0$ і

$$DN_i = DN_{i,\text{dark}} = b. \quad (6)$$

На основі рівняння (1) може бути отримане калібрувальне рівняння для опису лінійної залежності між значеннями спектральної енергетичної яскравості L_i на апертурі сенсора і цифровими значеннями пікселя DN_i у кожному спектральному діапазоні

$$L_i = \rho E_E r_i + E_A = \frac{DN_i}{k} - \frac{DN_{i,\text{dark}}}{k}. \quad (7)$$

З введенням додаткових коефіцієнтів радіометричного калібрування: G — радіометричний калібрувальний коефіцієнт підсилення, B — радіометричний калібрувальний коефіцієнт зміщення, з (7) отримуємо калібрувальне рівняння (9)

$$G = \frac{1}{k}, \quad B = -\frac{DN_{i,\text{dark}}}{k}, \quad (8)$$

$$L_i = G DN_i + B. \quad (9)$$

Отже, диференціальний метод радіометричного калібрування полягає у розрахунку коефіцієнтів калібрувальної характеристики за рівняннями (3), (4), (8) та відновленні у кожному спектральному діапазоні лінійної залежності спектральної енергетичної яскравості (9) на апертурі сенсора L_i від цифрових значень пікселя DN_i у наземних контрольних точках з подальшим усередненням спектральної енергетичної яскравості по поверхнях спостережуваних на супутникових зображеннях об'єктів. Метод дає можливість уникнути використання спектральної яскравості атмосфери E_E , зумовленої розсіюванням.

2. ПІДГОТОВКА ДАНИХ ТА ТЕСТУВАННЯ МЕТОДИКИ

Сформовано таблиці коефіцієнтів відбиття тестових об'єктів відповідно до спектральних діапазонів апаратури спостереження, отримані на основі даних наземних спектрометричних вимірювань. За знінками космічних систем (КС) «Січ-2» та Landsat 5 TM для відповідних ТО отримано цифрові значення яскравості пікселів DN у діапазоні [0, 255], що визначається 8-бітовим радіометричним розрізненням оптико-електронних сенсорів цих КС.

Дані характеристик атмосфери було отримано на основі спостережень міжнародної мережі AERONET [15]. Найближчою до контрольного-калібрувального полігону [1–7] у районі НЦУВКЗ (с. Вітине, АР Крим) (на час проведення тестування методики — літо 2012 р.) була станція прийому даних AERONET у м. Севастополь. Станція надавала дані спостережень оптичної товщі атмосфери τ , за значеннями якої за формулою (5) обчислювалися значення спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери ρ . Дані оптичної товщі атмосфери τ з мережі AERONET у м. Севастополь та обчислені дані коефіцієнта пропускання атмосфери ρ для часу отримання знімків відображені у табл. 1.

За даними спеціально сформованих таблиць коефіцієнтів відбиття тестових об'єктів та відповідних цифрових значень пікселів супутникового зображення обчислюються відповідні значення різниць $r_i - r_j$

Таблиця 1. Дані оптичної товщі атмосфери τ з мережі AERONET у м. Севастополь та обчислені дані коефіцієнта пропускання атмосфери ρ

Спектральний діапазон, нм	τ	ρ
440	0,371	0,689
500	0,266	0,765
675	0,115	0,891
870	0,049	0,951
1020	0,031	0,968

Таблиця 2. Оцінка калібрувального коефіцієнта підсилення для багатоспектрального сенсора Landsat 5 TM за коефіцієнтами відбиття 20 тестових об'єктів за розробленою методикою

Спектральний діапазон, нм	450–515	520–600	760–900	1550–1710	2080–2350
G	0,766	1,448	0,876	0,12	0,0656
\hat{G} (20 ТО)	0,936	1,509	0,883	0,13	0,0842
$\delta = \frac{G - \hat{G}}{\hat{G}}$ (%)	22	4	1	8	2

Таблиця 3. Оцінка калібрувального коефіцієнта підсилення для багатоспектрального сенсора Landsat 7 ETM+ за коефіцієнтами відбиття 68 тестових об'єктів за розробленою методикою

Спектральний діапазон, нм	520–600	630–690	760–900	1550–1750	2080–2350
G	0,796	0,619	0,965	0,126	0,0437
\hat{G} (68 ТО)	0,779	0,636	0,920	0,117	0,0424
$\delta = \frac{G - \hat{G}}{\hat{G}}$ (%)	-2	2	-5	-7	-3

та $DN_i - DN_j$. Результатом є відповідні симетричні матриці вказаних різниць.

За співвідношеннями (3), (4) з врахуванням даних табл. 1 проводиться поелементний розрахунок коефіцієнтів нахилу калібрувальної характеристики сенсора. Результатом є симетрична матриця коефіцієнтів k_{ij} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$). Статистичне оброблення даних коефіцієнтів виконується за всією множиною даних матриці, для яких $k_{ij} > 0$ та $r_i - r_j \neq 0$. Реалізовано три варіанти статистичного оброблення даних при оцінюванні коефіцієнта нахилу калібрувальної характеристики \hat{k} : як математичного сподівання за формулою (4), як медіани та моди сукупності значень k_{ij} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$).

Розрахунок радіометричних калібрувальних коефіцієнтів підсилення G та зміщення B проводиться за формулами (8), зокрема, значення коефіцієнта B розраховуються за знімками, зробленими у темряві.

Результати оцінювання калібрувального коефіцієнта підсилення \hat{G} за розробленою методикою на вибірці з статистично репрезентативних даних наземних вимірювань та знімків при розрахунку коефіцієнта нахилу калібрувальної характеристики \hat{k} для багатоспектральних сенсорів оптичного діапазону КС Landsat 5 TM і Lansat 7 ETM+ у порівнянні з відомими еталонними значеннями цього калібрувального коефіцієнта G для вказаних сенсорів наведено у табл. 2 та 3 відповідно. При отриманні даних, наведених у табл. 2 та 3, коефіцієнт \hat{k} розраховувався як медіана сукупності значень k_{ij} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$).

Аналіз табл. 2 свідчить про узгодження оцінених за запропонованою методикою значень коефіцієнта підсилення \hat{G} та еталонних даних калібрувального коефіцієнта підсилення G для багатоспектрального сенсора КС Landsat 5 TM за коефіцієнтами відбиття 20 тестових об'єктів з відносною похибкою δ від 1% до 22% у залежності від спектрального діапазону сенсора. Аналіз табл. 3 свідчить про узгодження оцінених за запропонованою методикою значень коефіцієнта підсилення \hat{G} та еталонних даних калібрувального коефіцієнта підсилення G для багатоспектрального сенсора КС Landsat 7 ETM+ за коефіцієнтами відбиття 68 тестових об'єктів з відносною похибкою δ від -7% до 2% у залежності від спектрального діапазону сенсора. Таким чином, можна відзначити задовільну точність розробленої методики калібрування оптико-електронних сенсорів та шукати шляхи її подальшого удосконалення.

3. ВИСНОВОК

Розроблено методику післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів космічного спостереження Землі, новизна якої полягає у реалізації диференціального методу врахування спектрального коефіцієнта відбиття тестових об'єктів за наземними вимірюваннями та у використанні коефіцієнта пропускання атмосфери, отриманого за даними світової мережі AERONET. Проведено оцінку калібрувального коефіцієнта підсилення багатоспектральних сенсорів космічних систем Landsat 5 TM та Landsat 7 ETM+ за розробленою методикою, яка дала відносно похибку від 1% до 22% та від -7% до

2% для відповідних сенсорів у залежності від спектрального каналу сенсора у порівнянні з еталонними даними калібрувального коефіцієнта сенсорів цих космічних систем.

1. *Zyelyk Ya.I., Yatsenko V.A., Nabivach V.E., Semeniv O.V., Pidgorodetska L.V.* Creation of Calibration Test Site of Subsatellite Support // *Journal of Automation and Information Sciences.* — 2013. — Vol. 45, Iss. 12. — P.48–65.
2. *Zyelyk Ya.I.* Information-technological support of post launch calibration of optoelectronic monitoring sensors of “Sich” space system // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* — 2013. — Vol. 5, No. 9(65). — P.27–38.
3. *Зельик Я.І., Семенів О.В.* Створення геоінформаційної бази даних підсупутникового калібрувального полігону // *Вісник Астрономічної школи.* — 2014. — Т. 10, № 2. — С.115–122.
4. *Зельик Я.И.* Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения космической системы «Сич» // *Вісник Астрономічної школи.* — 2013. — Т. 9. — С.93–101.
5. *Попов М.О., Станкевич С.А., Зельик Я.І., Шкляр С.В., Семенів О.В.* Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи “Січ-2” за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // *Космічна наука та технологія.* — 2012. — Т. 18, № 5. — С.59–65.
6. *Попов М., Stankevich S., Zyelyk Ya., Shchlyar S., Semeniv O.* Method of Spectral Calibration of “Sich-2” Multispectral Satellite System // *The Report to the COSPAR. Space Research in Ukraine 2010–2012.* — Kyiv: «Academpriodyca», 2012. — P.68–69.
7. *Попов М.О., Stankevich S.A., Zyelyk Ya.I., Shchlyar S.V., Semeniv O.V.* Spectral response in-flight estimation of Sich-2 multispectral satellite system // *Ukrainian Journal of Remote Sensing.* — 2014. — No. 1. — P.16–17.
8. *Абламейко С.В., Беляев Б.И., Зельик Я.И., Катковский В.Л., Лялько В.И., Попов М.А., Подгородецкая Л.В., Яценко В.А.* Современное состояние и перспективы использования тестовых полигонов ДЗЗ: цели, задачи, принципы и концепции // *Пятый белорусский космический конгресс (Минск, 25–27 октября 2011 г.).* Материалы конгресса. — Минск: Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, 2012. — Т.1. — С.172–176.
9. *Попов М.А., Станкевич С.А., Зельик Я.И., Шкляр С.В., Семенів О.В., Дугин С.С., Жуков Б.С.* Оценивание спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры спутниковой системы “Сич-2” по наземным спектрометрическим измерениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* — 2014. — Т. 11, № 2. — С.152–164.
10. *Лялько В.И., Попов М.А., Станкевич С.А., Зельик Я.И., Черный С.В., Яценко В.А.* Полигоны ДЗЗ в Украине: современное состояние и направления дальнейших исследований и разработок // *Український метрологічний журнал.* — 2014. — № 2. — С.15–26.
11. *Авдеев М.А., Черный С.В.* Методические погрешности градуировки многозональных сканирующих устройств широкополосным сигналом // *Системи обробки інформації.* — Харків: ХУ ПС ім. І.Кожедуба, 2013. — Вип. 6(113). — С.45–51.
12. *Чорний С.В., Авдеев М.А., Зельик Я.І., Коваленко О.О.* Оцінювання розрізняювальної здатності систем дистанційного зондування Землі з використанням еталонних знімків на підставі вирішення зворотних задач оптики // *XII Українська конференція з космічних досліджень (Євпаторія, 3–7 вересня 2012 р.).* Матеріали конференції. — Київ: Інститут космічних досліджень НАНУ-ДКАУ, 2012. — С.88.
13. *Коваленко А.А., Черный С.В., Авдеев М.А.* Экспериментальный полевой спектрометр оптического диапазона на основе дискретных широкополосных фотоприемников // *XII Українська конференція з космічних досліджень (Євпаторія, 3–7 вересня 2012 р.).* Матеріали конференції. — Київ: Інститут космічних досліджень НАНУ-ДКАУ, 2012. — С.90.
14. *Чорний С.В., Коваленко О.О.* Програмне забезпечення для радіометричного калібрування багатоспектральних оптичних систем дистанційного зондування Землі за перехресним методом // *XIV Українська конференція з космічних досліджень (Ужгород, 8–12 вересня 2014 р.).* Матеріали конференції. — Київ: Інститут космічних досліджень НАНУ-ДКАУ, 2014. — С.157.
15. AERONET (AErosol RObotic NETwork) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov> (01.12.2017).
16. ASTM E490–00a. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.astm.org/database.cart/historical/E490-00A.htm> (01.12.2017).
17. Ступодедия. Закон Бугера. Коэффициент поглощения [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://studopedia.su/10_92299_zakon-bugera-koeffitsient-pogloshcheniya.html (01.12.2017).

Послестартовая радиометрическая калибровка оптико-электронных сенсоров космического наблюдения Земли дифференциальным методом с учетом коэффициента пропускания атмосферы

Зельк Я.И., Черный С.В., Подгородецкая Л.В.

Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины,
03680, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1

Рассмотрена разработанная методика послестартовой радиометрической калибровки оптико-электронных сенсоров космического наблюдения Земли, новизна которой заключается в реализации дифференциального метода учета спектрального коэффициента отражения тестовых объектов по наземным измерениям и в использовании коэффициента пропускания атмосферы, полученного по данным мировой сети AERONET.

Ключевые слова: послестартовая радиометрическая калибровка; оптико-электронный сенсор; калибровочный полигон; тестовый объект; спектральный коэффициент отражения; спектральный коэффициент пропускания атмосферы; AERONET.

Post-launch radiometric calibration of electro-optic sensors for Earth from space observation by differential method with the taking into account atmosphere transmittance coefficient

Zyelyk Ya.I., Chornyy S.V., Pidgorodetska L.V.

Space Research Institute NASU & SSAU, Hlushkova Avenue 40, building 4/1, 03680 Kyiv, Ukraine

The developed methodology of the post-launch radiometric calibration of the electro-optic sensors for Earth from space observation is considered. The novelty of this methodology consist in the implementation of the differential method for taking into account the spectral reflection coefficient of test objects from ground-based measurements, and in using of the atmospheric transmittance coefficient obtained from the world AERONET network data. The objective of the radiometric electro-optic sensor post-launch calibration consist in the evaluation of the linear regression dependence of the digital pixel number at sensor output from the spectral radiance at sensor aperture on Top of Atmosphere (TOA). The proposed differential method of the electro-optic sensor radiometric calibration is implemented in each spectral channel in the following stages: 1) determination of the coefficient of the sensor calibration characteristic inclination on the values of the spectral reflectance differences in all possible different pairs of ground measurement points on the surface of the test objects; 2) estimation of the coefficient of the calibration characteristic inclination as a mathematical expectation or as a median or a mod for a set of calculated its differential values; 3) determination on the basis of estimation of the coefficient of the calibration characteristic inclination the radiometric calibration coefficients: gain and offset; 4) recovery using the obtained radiometric calibration coefficients linear dependence of the spectral radiance at sensor aperture from the digital pixel numbers by the space imagery at the ground control points. The differential radiometric calibration method makes possible to avoid of unknown spectral radiance of the atmosphere caused by scattering. The atmospheric characteristics data were obtained from the international network AERONET observations. The nearest station to calibration test site in the area of the National Center for Space Facilities Control and Testing (Vitine, Crimea) (during the method testing procedure — summer 2012) was AERONET station in Sevastopol. The station provided the observational data of the atmosphere optical thickness, by whose values the atmosphere spectral transmittance were calculated based on the Bouguer law. The estimation of the calibration gain factor of the Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ multispectral sensors on the developed methodology were obtained, which were provided the relative error from 1% to 22% and from -7% to 2% for the corresponding sensors, depending from the spectral channel of the sensor in comparison with etalon data of the calibration gain of these space systems sensors.

Keywords: post-launch radiometric calibration; electro-optic sensor; calibration test site; test object; spectral reflectance; atmospheric transmittance; AERONET.

Надійшла до редакції / Received	13.11.2017
Виправлена авторами / Revised	18.12.2017
Прийнята до друку / Accepted	20.12.2017