

КАЛІБРУВАННЯ СЦЕН СУПУТНИКІВ LANDSAT-8 ТА SENTINEL-2

Анотація. В роботі проведено аналіз процесів попередньої обробки знімків супутників Landsat 8 та Sentinel-2 і розглянуто можливості здійснення калібрування користувачем на основі даних у відкритому доступі. Результати дослідження свідчать про застосовність інформації, наведеної у метаданих сцени для здійснення необхідного калібрування.

Ключові слова: багатоканальне зображення, радіометрична корекція, калібрування, енергетична яскравість.

Постановка проблеми. Аналіз супутникових зображень високого просторового розрізнення є сучасним зручним інструментом, який надає значну кількість корисної для науки та бізнесу інформації. Подібний інструмент, так само як і знімки, надається зазвичай великими організаціями у межах спеціально організованого сервісу. Так, більшість супутників країн Європейського союзу запущені та функціонують під керівництвом Європейського Космічного Агентства у рамках програми Copernicus. Відповідно, сервіс, що надає супутникову інформацію про земну поверхню – Copernicus Land Monitoring Service. Даний сервіс надає різноманітну біофізичну інформацію стосовно земної поверхні по всьому земному шару, включаючи стан рослинності.

Проте ця корисна інформація не може бути наданою споживачу одразу у момент зйомки орбітальним сенсором, а повинна пройти попередню багатоетапну обробку [1, 2]. Причому здійснюється вона як на борту супутника так і на наземних станціях. Окрім оцифрованої інформації безпосередньо з детекторів супутника, що безперервно відсилається на Землю, додатково відсилаються допоміжні дані – телеметрія супутника, калібрувальні та інші дані, необхідні для обробки супутникового зображення. Наприклад, сенсори одного тільки Landsat 8 OLI та TIRS в середньому транслюють сигнали на швидкостях 265 та 26.2 Мбіт/сек [3]. Тому в цілому необхідними є швидкісні і стабільні алгоритми попередньої обробки і стиснення цього значного потоку інформації, вичленення з нього лише тих даних, що є необхідними для виконання поставлених задач.

Аналіз останніх досліджень. Математичні моделі та аналіз особливостей функціонування супутникових систем, що базуються на лінійках приладів із зарядовим зв'язком, розглянуті у [4]. У даній роботі автор приходить до висновку, що калібрування оптичних супутників із високим просторовим розрізненням потребує коректної математичної моделі реконструкції геометрії зображення. Ця модель повинна вичерпно включати в себе додаткові параметри, необхідні для калібрування оптичного сенсора. Отже питання вибору оптимального набору параметрів є ключовим.

Формулювання цілей статті. Виникає необхідність в дослідженні методик калібрування для широкоживаних супутникових сенсорів, таких як Landsat 8 та Sentinel-2. Необхідно визначити, які дані є необхідними і достатніми для здійснення процедур калібрування, маючи на меті оптимізацію процесу калібрування та підвищення візуальної якості зображення.

Основна частина. Надіслані супутником зображення потребують багатоетапної обробки перед тим як над ними можна буде здійснювати аналіз. Крім того, слід відзначити, що постачальники супутникових знімків роблять додаткові вимірювання, щоб провести попередню обробку знімків, і можуть надавати як оброблені знімки, так і необроблені з додатковою інформацією для самостійної обробки і коригування.

Отримані сенсором цифрові дані проходять первинну обробку спершу на борту супутника. Так, сенсор супутника Sentinel-2, так званий MSI (мультиспектральний інструмент), працює у пасивному режимі, збираючи відбите поверхнею Землі сонячне світло. Сприйняте світло на першому етапі розділяється фільтром і окремими фокальними площинами на дві групи: видимі та ближні інфрачервоні канали в першій та короткохвильові канали – у другій. Спектральне розділення кожного каналу за індивідуальними довжинами хвиль здійснюється вже смуговими фільтрами, що встановлені в детекторах. Крім того, спеціальний механізм захищає інструмент від прямого освітлення Сонця і він же функціонує як калібрувальний пристрій, збираючи сонячне світло після відбиття дифузоровою поверхнею [5].

Зображення стискаються на борту супутника для того, щоб скоротити об'єм даних, які передаються з космосу до Землі. Перед компресією, вони грубо еквалізуються, щоб мінімізувати сигнальну ентропію і підвищити якість компресії. Алгоритм компресії базується на застосуванні дискретного вейвлет-перетворення і є наближеним до стандарту JPEG2000. Ступені стиснення доволі низькі, що дає змогу в цілому зберегти якість зображення, і для кожного з каналів окремі [6].

Загалом, у попередній обробці супутникового зображення можна виділити наступні етапи:

1. Геоприв'язка;
2. Ортокорекція;
3. Радіометрична корекція та калібрування;
4. Атмосферна корекція.

Приблизна геоприв'язка обчислюється по вихідному положенню супутника на орбіті і геометрії зображення. Уточнення геоприв'язки виконується по наземним точкам прив'язки (Ground Control Points - GCP). Здійснюється пошук контрольних точок на карті і на знімку, а знаючи їх координати в різних системах координат, можна знайти варіанти перетворення (конформне, афінне, перспективне або поліноміальне) з однієї системи координат в іншу.

Ортокоректування зображення - процес геометричної корекції зображень, при якому усуваються перспективні спотворення, розвороти, спотворення викликані викривленнями об'єктива тощо. Зображення при цьому приводиться до планової проєкції, тобто такий, при якій кожна точка місцевості спостерігається строго вертикально, в надир. Так як супутники здійснюють зйомку з дуже великої висоти, то при зйомці в надирі спотворення повинні бути мінімальними. Але космічний апарат не може весь час знімати в надирі, інакше довелось б дуже довго чекати моменту, коли він пройде над заданою точкою. Для усунення цього недоліку супутник "обертають", і більшість кадрів виходять перспективними. Слід зауважити, що кути зйомки можуть досягати 45 градусів, і при великій висоті це призводить до значних спотворень. Ортокорекцію потрібно проводити, якщо потрібні вимірювальні і позиційні властивості зображення. Вона виконується за допомогою реконструкції геометрії датчика в момент реєстрації для кожного рядка зображення і поданні рельєфу в растровому вигляді. Для цього модель камери супутника представляється у вигляді узагальнених апроксимуючих функцій (раціональних поліномів - RPC коефіцієнтів), а висотні дані можуть бути отримані в результаті наземних вимірювань, за допомогою горизонталей з топографічної карти, стереозйомки, по радарним даними або з загальнодоступних грубих цифрових моделей рельєфу: SRTM (розрізнення 30-90 м) і ASTER GDEM (розрізнення 15-90 м).

Радіометрична корекція – виправлення на етапі попередньої підготовки знімків апаратних радіометричних спотворень, обумовлених характеристиками знімального приладу. Для сканерних знімальних приладів такі дефекти спостерігаються візуально як модуляція зображення (вертикальні і горизонтальні смуги). При радіометричній корекції та-

кож видаляються спотворення зображення, які спостерігаються як дефектні пікселі зображення .

Радіометричну корекцію можна здійснювати або на основі статистичних даних або з використанням відомих параметрів і налаштувань знімального приладу (коригувальних таблиць). У другому випадку необхідні коригувальні параметри визначаються для знімального приладу на основі тривалих наземних і польотних випробувань. Корекція статистичним методом виконується шляхом виявлення дефекту і його характеристик безпосередньо з самого зображення, що підлягає корекції. Знімки, що спочатку отримуються з супутників, записані у вигляді так званих “сірих” значень яскравості DN (Digital Number). Дані в такому форматі не можна адекватно зіставити з даними інших зйомок. Завдання радіометричного калібрування полягає в приведенні цих значень у фізичні одиниці. Загальна формула для калібрування багатозональних знімків в оптичному діапазоні:

$$B_{\lambda} = K_{\lambda} \cdot DN_{\lambda} + C_{\lambda}, \quad (1)$$

де B_{λ} – енергетична яскравість для спектральної зони λ , DN_{λ} – “сірі” значення яскравості, K_{λ} – калібрувальний коефіцієнт, C_{λ} – калібрувальна константа.

Слід враховувати який рівень (відповідна ступінь обробки супутникових даних) продукту надається постачальником. Європейське космічне агентство вільно розповсюджує дані сенсора Sentinel-2 рівня Level-1C (так звані відбиття на поверхні атмосфери – Top-Of-Atmosphere), що мають доволі виский ступінь обробки, однак потребують і деякої подальшої обробки для покращення сприйняття і використання – корекції хмарності і видалення серпанку та водних випаровувань. Згідно з розрахунками, вплив атмосфери призводить в першу чергу до зміни спектральних характеристик випромінювання, що реєструється. Разом з тим у типовій ситуації повну модель атмосфери неможливо застосувати одразу до усіх пікселів космічного знімка. Існують різні алгоритми виконання атмосферної корекції (наприклад метод DOS - Dark Object Subtraction [7]). Вхідними параметрами для моделей слугують: геометрія розташування Сонця і датчика, атмосферна модель для газоподібних компонентів, модель аерозоля (тип і концентрація), оптична товщина атмосфери, коефіцієнт поверхневого відображення і спектральні канали. Для атмосферної корекції можна також застосовувати різні алгоритми видалення серпанку із зображення, наприклад Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior або алгоритм із застосуванням так званої карти товщини серпанку – Haze Thickness Map [8, 9].

Якщо ж відзначати процес саме радіометричного калібрування, то серед популярних супутників її здебільшого потребують сенсори серії Landsat (на відміну від даних рівня Level-1C супутника Sentinel 2, калібрування яких користувачами вже майже не впливає на якість зображення, а здійснюється на практиці простим множенням значення пікселя на константу). Окрім багатоступеневої системи калібрувань перед запуском самого супутника обидва сенсори Landsat 8, багатоспектральний OLI та термальний TIRS, обслуговуються під час функціонування окремою командою. Ця команда оновлює файли калібрувальних параметрів, що містять необхідні для калібрування параметри, щонайменше раз на три місяці. Тому безкоштовні дані рівня Level-1 Landsat 8 можливо покращити, застосовуючи потрібну інформацію з метаданих кожної сцени, а саме фактори яскравості та відбиття – RADIANCE_MULT_BAND, RADIANCE_ADD_BAND, REFLECTANCE_MULT_BAND, REFLECTANCE_ADD_BAND, що є специфічними для кожного з каналів, і кут нахилу Сонця на момент зйомки даної сцени SUN_ELEVATION. Співвідношення для яскравості:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cat} + A_L, \quad (2)$$

де M_L і A_L – це і є RADIANCE_MULT_BAND та RADIANCE_ADD_BAND відповідно.

Перетворення у значення відбиття на поверхні атмосфери має наступний вигляд:

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} \cdot Q_{cat} + A_{\rho}, \quad (3)$$

де M_{ρ} і A_{ρ} – відповідно REFLECTANCE_MULT_BAND і REFLECTANCE_ADD_BAND.

Причому для отримання істинного значення відбиття необхідно врахувати кут нахилу Сонця (θ – SUN_ELEVATION) за формулою:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta)}. \quad (4)$$

Різницю між відкаліброваними і необробленими даними найкраще помітно при візуалізації індексів, наприклад нормалізованого вегетативного NDVI, що і наведено на рисунку 1. Індекс на основі відкаліброваних даних має більш правильні значення і коректніше відображає рослинний покрив на цифровому зображенні.



а) б)
Рисунок 1 – Візуалізація індексу NDVI на основі:
а) необроблених даних; б) відкаліброваних даних

Висновки. В роботі проведено аналіз процесів попередньої обробки знімків супутників Landsat-8 та Sentinel-2, розглянуто можливості здійснення калібрування користувачем на основі даних, що надаються постачальниками у режимі відкритого доступу. Результати дослідження свідчать про застосовність і достатність калібрувальної інформації, наведеної у метаданих сцени для здійснення необхідного калібрування сцени користувачем із застосуванням запропонованих формул.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hnatushenko V.V., Kavats O.O., Kibukevych I.O. Efficiency determination of scanner data fusion methods of space multispectral images. International Young Scientists Forum on Applied Physics «YSF-2015». Dnipropetrovsk, Ukraine. Doi: 10.1109/YSF.2015.7333153
2. Гнатушенко В.В. Геометричні моделі формування та попередньої обробки цифрових фотограмметричних зображень високого просторового розрізнення: Автореферат дис... д-ра наук: 05.01.01 - К.: КНУБА, 2008. 25 с.
3. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook [ел. ресурс] / Реж. доступу: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook>
4. Jacobsen K. Geometry of satellite images—calibration and mathematical models. Korean Society of Remote Sensing (Hrsg.):ISPRS international conference,Jeju,2004 pp.182-185.
5. Sentinel-2 User Handbook [ел. ресурс]/ Реж.доступу: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook
6. Gascon, F.; Thйpaut, O.; Jung, M.; Francesconi, B.; Louis, J.; Lonjou, V.; Lafrance, B.; Massera, S.; Gaudel-Vacaresse, A.; Languille, F.; Alhammoud, B.; Viallefont, F.; Bieniarz, J.; Pflug, B.; Clerc, S.; Pessiot, L.; Trйmas, T.; Cadau, E.; De Bonis, R.; Isola, C.; Martimort, P.; Fernandez, V. Copernicus Sentinel-2 Calibration and Products Validation Status. Preprints 2016, 2016100078 (doi: 10.20944/preprints201610.0078.v1).
7. Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P. and Macomber, S.A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. Remote Sensing of Environment 75, 2001, 230-244.
8. K. He, J. Sun, X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior", PAMI, vol. 33, no. 12, pp. 2341-2353, 2011.
9. A. Makarau, R. Ritcher, R. Muller, P. Reinartz, "Haze detection and removal in remotely sensed multispectral imagery", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 9, pp. 5895-5905, 2014.