

УДК 528.714;528.854.4;551.593.5

**МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ
ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДУЛЕЙ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ
НА ОСНОВЕ СНИМКОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Защепко П. А.^{1,2}, Зайцева В. А.¹, Данильченко А. Ю.¹, Федорцев Р. В.²

¹ОАО «Пеленг»,

²Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Аннотация. В программное обеспечение (ПО) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по обработке целевой информации (ЦИ) входят множество важных модулей и подпрограмм, одним из которых является модуль атмосферной коррекции (АК). В данной статье представлен способ формирования тестовых данных для модулей АК на основе снимков, полученных с функционирующих на орбите КА. В будущих работах предлагается использование данного метода формирования тестовых данных при комплексной оценке работоспособности алгоритма АК RACE, как один из этапов предполетных испытаний.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, атмосферная коррекция, программное обеспечение, тестирование.

**METHOD OF CREATING TEST DATA FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT
OF THE PERFORMANCE OF ATMOSPHERIC CORRECTION MODULES BASED
ON IMAGES OF FUNCTIONING SPACE VEHICLES**

Zashchepko P.A.^{1,2}, Zaitseva V.A.¹, Danilchenko A.Y.¹, Fiodartsau R.V.²

¹Peleng JSC

²Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus

Abstract. The software (SW) of spacecraft (SC) for remote sensing of the Earth (ERS) for processing target information (TI) includes many important modules and subroutines, one of which is the atmospheric correction (AC) module. This article presents a method for generating test data for the AC modules based on images obtained from spacecraft operating in orbit. In future works, it is proposed to use this method for generating test data in a comprehensive assessment of the operability of the AC RACE algorithm, as one of the stages of pre-flight testing.

Keywords: earth remote sensing, spacecraft, atmospheric correction, software, testing.

Адрес для переписки: *Защепко П. А., ул. Якуба Коласа, 22 к.1, г. Минск 220013, Республика Беларусь*
e-mail: *bntu@bntu.by*

Модули атмосферной коррекции. Обработка целевой информации (ЦИ) ДЗЗ является частью формирования достоверной информации о поверхности Земли. Обработкой ЦИ занимается специализированное программное обеспечение (ПО), которое организуется как последовательность модулей для выполнения своей тематической задачи. Одним из таких модулей является модуль атмосферной коррекции (АК). Конечными продуктами модуля АК являются расчет альbedo Земной поверхности [1] и получение информации об основных параметрах атмосферы по снимкам КА ДЗЗ [2].

Не смотря на основную цель АК (восстановление альbedo), модули АК имеют дополнительный функционал. В частности, для корректной работы в него входят создание: карт снежных пикселей, карт облачных пикселей, карт классификаций, карт аэрозольной оптической толщины (АОТ), карт содержания водяного пара и другое [2].

В Институте физики НАН Беларуси был разработан алгоритм АК RACE, который по снимкам низкого разрешения восстанавливает альbedo снимков высокого разрешения. Конкретно для данного алгоритма, который является примером

и объектом исследования, дополнительными результатами обработки являются: карта облачности и снега, значение АОТ и значение содержания водяного пара [3].

Оценка работоспособности АК. До момента проведения космической съемки и получения реальных данных в период предполетных испытаний необходимо выполнить тестирование модуля АК. Оценка работоспособности проводится на заранее подготовленных тестовых данных. Из-за отсутствия реальных снимков разрабатываемого КА, тестовые данные формируются из данных действующих КА со схожими спектральными диапазонами съемки.

Оценку работоспособности (или тестирование) модулей АК можно разделить на количественную и качественную составляющие.

Качественная оценка при тестировании модуля АК заключается в определении визуальных искажений (смазы, разрывы и другие артефакты изображений) [4, 6, 11] при обработке достаточно протяженных маршрутов съемки.

Количественная оценка АК подразумевает определение быстродействия работы заложенных алгоритмов и точности восстановления рассчитываемых параметров.

ваемых параметров (альбедо и атмосферных параметров). Для определения точности разрабатываемого модуля используют сравнения с данными другого ПО АК [4–8] или наземными измерениями [2, 4, 8–11].

Для облегчения обработки ЦИ модуль АК разделяет снимок на условные кадры (УК) и формирует выходные данные для каждого из них [1, 2].

При проведении АК по нескольким УК, составляющих маршрут съемки, возникает так называемая проблема мозаик («Mosaic Implications») [4]. Резкие перепады восстановленных значений атмосферных параметров и использование неточной интерполяции данных приводит к резким переходам в местах сшивания УК. Это вызывает необходимость тестирования модуля АК на достаточно протяженных маршрутах съемки и качественной оценке атмосферной коррекции ЦИ.

Для модуля АК RACE была проведена оценка точности восстановления альбедо по выборочным 22 УК космического аппарата Sentinel-2 разной местности с большим разнообразием объектов [5]. Было установлено, что модуль АК RACE сопоставим по эффективности восстановления альбедо с модулем АК космического аппарата Sentinel-2 (Sen2Cor).

Для полноценного тестирования модуля АК необходимо выполнить комплексную (качественную и количественную) оценку при обработке максимального по длительности маршрута съемки.

Тестовые данные для модулей АК. Как отмечалось выше, тестовые данные сформированные на основе функционирующего КА должны совпадать (или быть достаточно близки [5]) с спектральными диапазонами создаваемого (тестируемого) КА.

Для алгоритма АК RACE, на основе [5], за тестовые данные можно принять ЦИ Sentinel-2.

Ключевым этапом формирования тестовых данных является определение размера и положения участка маршрута на основе начальных параметров КА и съемочной системы. Основными характеристиками являются:

- высота и тип орбиты КА (для моделирования орбиты КА);
- проекция пикселя на Землю (GSD), м;
- ширина полосы захвата съемки (W), км;
- время съемки (T_c), с.

Скорость полета КА рассчитывается [12, 13]:

$$V_{КА} = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H}}, \quad (1)$$

где μ – произведение гравитационной постоянной на массу притягивающего тела (в данном случае Земли), называемое гравитационным параметром, m^3/c^2 ; R_3 – радиус Земли (в [12] – экваториальный, в [13] – средний), км; H – высота полета КА, км.

Заранее учитывается эллипсность Земли при использовании в расчете ее радиуса [14]:

$$R_{3,Г}(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cdot \cos(\varphi))^2 + (b^2 \cdot \sin(\varphi))^2}{(a \cdot \cos(\varphi))^2 + (b \cdot \sin(\varphi))^2}}, \quad (2)$$

где a – большая полуось Земли (экватор), км; b – малая полуось Земли (полюс), км; φ – широта, град.

На основе формул (1) и (2) выводится скорость КА подспутниковой точки (ПСТ):

$$V_{ПСТ}(\varphi) = V_{КА} \cdot \frac{R_{3,Г}(\varphi)}{R_3 + H}. \quad (3)$$

где $V_{КА}$ – скорость полета КА, км/с; $R_{3,Г}(\varphi)$ – радиус Земли, км.

В соответствии с параметрами орбиты КА формируются модели широты $\varphi(t)$ и долготы $\lambda(t)$ ПСТ зависящие от времени съемки T_c [15]. Устанавливается начальное положение ПСТ (при отсутствии требований, предлагается установить $\varphi(0) = \lambda(0) = 0$).

В зависимости от начальных требований (время съемки T_c , ширина полосы захвата W) и выведенной модели расчета широты и долготы ПСТ рассчитывается размер и положение интересующего участка маршрута.

Для алгоритма АК RACE сбор и формирование тестовых снимков по выведенному маршруту на основе снимков Sentinel-2 осуществляется через сайт Copernicus Open Access Hub [16]. Пример проекции имитируемого участка на маршрут Sentinel-2 приведен на рисунке 1.

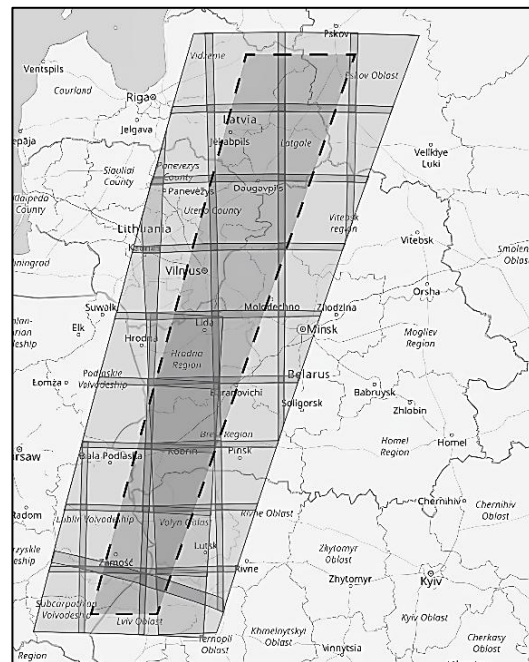


Рисунок 1 – Проекция имитируемой съемки (штриховая) на маршрут съемки КА Sentinel-2

Основными параметрами снимка являются: размеры снимка (длина и ширина в пикселях), координатная привязка пикселей, пространственное разрешение пикселей (GSD), значение пикселей скорректированные радиометрической коррекцией.

Данные, необходимые для проведения тестирования, включают в себя уровни обработки L1C (до АК, но после радиометрической коррекции) и L2A (после АК Sen2Cor, необходимы для сравнения). Файлы L2A можно получить непосредственно через сайт Copernicus или через обработку собранных изображений уровня L1C приложением SNAP с встроенным модулем Sen2Cor [17]. Кроме формирования изображений уровня обработки L2A, SNAP выполняет функцию редактора и инструмента сшивки и передискретизации снимков Sentinel-2, что позволяет упростить процесс формирования тестовых данных. Передискретизация также необходима для геометрического преобразования географических координат пикселя.

Необходимо отметить, что с учетом специфики работы спектральных каналов разрабатываемой ЦА проводится соответствующая им по специфике передискретизация изображений спектральных каналов ЦА функционирующих КА (для АК RACE: 10 м для основной ЦИ, 60 м для параметров атмосферы).

Кроме процесса сшивания снимков, необходима конвертация изображений в стандартный формат ДЗЗ (GeoTiff/Tiff).

Так как, ПО SNAP имеет ограничение при сохранении изображений в требуемый формат с большим объемом данных, необходимо воспользоваться дополнительным ПО ENVI [18], у которого отсутствует данное ограничение.

Для форматирования тестовых данных, можно использовать один из языков программирования (Python, C#, C++ или другие).

Заключение. Таким образом, была сформирована методика создания тестовых данных на основе снимков, функционирующих КА ДЗЗ. В качестве продолжения работы, предлагается практическое применение сформированного метода создания тестовых данных в комплексной оценке работоспособности алгоритма АК RACE, как один из этапов предполетных испытаний.

Литература

- ГОСТ Р 59759-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Радиометрическая коррекция данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Требование к алгоритмам. – Введ. 01.05.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 24 с.
- Sen2Cor for Sentinel-2 / M. Main-Knorn [et al.] // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII: proc. of SPIE. – Warsaw, 2017. – Vol. 10427. – Art. 1042704.
- A robust atmospheric correction procedure for determination of spectral reflectance of terrestrial surfaces from satellite spectral measurements / I. L. Katsev [et al.] // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, № 9. – Art. 1831.
- Smith, J. M. A Comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC Atmospheric Compensation Algorithms Using WorldView-2 Imagery / J. M. Smith // Department of Civil Engineering Master's Report. – University of Colorado, 2015. – 39 p.
- Защепко, П. А. Оценка абсолютной погрешности модуля атмосферной коррекции RACE по космическим снимкам со спутников Sentinel-2 / П. А. Защепко, В. А. Зайцева, Р. В. Федорцев // Фотоника. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 312–323.
- Lantzanakis, G. Comparison of physically and image based atmospheric correction methods for Sentinel-2 satellite imagery / G. Lantzanakis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9688. – Art. 968819.
- Cetin, M. A comparison of Atmospheric correction methods on Hyperion imagery in forest areas / M. Cetin, N. Musaoglu, O. H. Kocal // Uludag University Journal of the Faculty of Engineering. – 2017. – Vol. 22, № 1. – P. 103–114.
- Lantzanakis, G. Comparison of physically and image based atmospheric correction methods for Sentinel-2 satellite imagery / G. Lantzanakis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis // Perspectives on Atmospheric Sciences. – 2017. – P. 255–261.
- Evaluation of Sentinel-2A Surface Reflectance Derived Using Sen2Cor in North America / Y. Li [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 2357–2371.
- Pan, Y. Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms over Lakes for High-Resolution Multispectral Imagery: Implications of Adjacency Effect / Y. Pan, S. Bélanger, Y. Huot // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, № 13. – Art. 2979.
- Wang, D. Evaluation of five atmospheric correction algorithms for multispectral remote sensing data over plateau lake / D. Wang, B. H. Tang, Z. L. Li // Ecological Informatics. – 2024. – Vol. 82. – Art. 102666.
- Михайловский, К. В. Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли / К. В. Михайловский, М. А. Городецкий // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 361–372.
- Азаренок, Н. А. Расчет скорости движения космических аппаратов / Н. А. Азаренок, А. А. Михеева, В. В. Ялтыхов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. – 2005. – № 9. – С. 91–92.
- Grewal, M. S. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, A. P. Andrews, C. G. Bartone. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. – 608 p.
- Куренков, В. И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. – 296 с.
- Copernicus Browser: [сайт]. – URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата обращения: 27.08.2025).
- Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications / J. Segarra [et al.] // Agronomy. – 2020. – Vol. 10, № 5. – Art. 641.
- Li, X. Comparison of several remote sensing image classification methods based on ENVI / X. Li, L. Liu, L. Huang // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – Vol. XLII-3/W10. – P. 605–611.