

УДК 621

МЕТОДЫ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Защепко П. А., Фёдорцев Р. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для получения качественных снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) целевая информация (ЦИ), полученная с космических аппаратов, проходит несколько стандартных уровней обработки, одним из которых является атмосферная коррекция (АК). АК выполняется на основе индивидуально разработанных математических моделей и ряда предположений, что подразумевает собой разработку новых комплексных программ и решений. В данной работе описаны основные концепции АК и их существующие исполнения в виде методов и программных обеспечений (ПО). В ходе изучения и анализа существующих методов и алгоритмов АК предлагается продолжение работ по разработке нового метода АК с использованием результатов съемки многоспектрального прибора, работающей синхронно с целевой аппаратурой космического аппарата.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, дистанционное зондирование Земли, программное обеспечение, сигнал.

METHODS OF ATMOSPHERIC CORRECTION OF SPACE IMAGES FOR ADVANCED REMOTE SENSING SATELLITES

Zashchepko P., Feodortsau R.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. To obtain high-quality remote sensing (RS) images, the target information (TI) received from spacecraft undergoes several standard levels of processing, one of which is atmospheric correction (AC). AC is performed on the basis of individually developed mathematical models and a number of assumptions, which implies the development of new complex programs and solutions. This paper describes the basic concepts of AC and their existing implementations in the form of methods and software (SW). In the course of studying and analyzing existing AC methods and algorithms, it is proposed to continue the work on the development of a new AC method using the results of multispectral instrument imaging, operating synchronously with the target spacecraft hardware

Key words: atmospheric correction, remote sensing, software, signal.

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

Концепция АК. Атмосферная коррекция космических снимков является одной из важных проблем ДЗЗ. Ее основная задача – восстановление альбедо земной поверхности. На основе теории переноса излучения, формируемый сигнал представляет собой суперпозицию сигналов от атмосферы и подстилающей поверхности. Со стороны атмосферы основными факторами искажающий сигнал от земной поверхности являются аэрозольное («нестабильный» фактор – аэрозольная оптическая толщина, АОТ) и молекулярное («стабильный» фактор – рэлеевское рассеяние) рассеяние, а также поглощение газами и парами воды в атмосфере [1].

Общий вид переноса излучения от поверхности Земли к оптико-электронной аппаратуре (ОЭА) космического аппарата ДЗЗ представлен на рисунке 1.

Коррекции снимков заключается в следующем. Первым этапом обработки является их радиометрическая коррекция – пересчет «сырых» значений пикселей (DN) в значения спектральной плотности энергетической яркости $L_{e\ TOA}$ (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы.

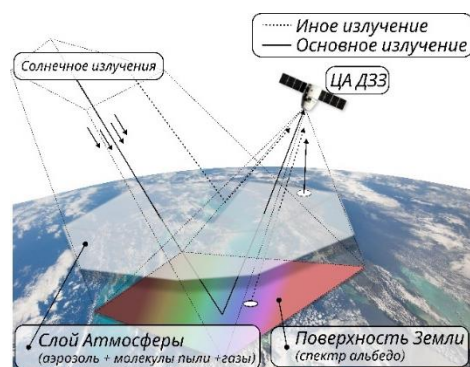


Рисунок 1 – Представление передачи сигнала в атмосфере

Стандартная формула радиометрической коррекции приведена в ГОСТ Р 59759-2021 и имеет вид [2]:

$$L_{e\lambda\ TOA} = A_{\lambda} DN_{\lambda} + B_{\lambda}, \quad (1)$$

где, A_{λ} – спектральный коэффициент преобразования опорного цифрового детектора; DN_{λ} – значение цифрового отсчета пикселя в заданном спектральном канале; прошедшее относительную

радиометрическую коррекцию; B_λ – спектральный коэффициент смещения опорного цифрового детектора.

После проведения радиометрии следующим этапом обработки реализуется атмосферная коррекция [2]:

$$\rho_{\lambda TOA} = \rho_{\lambda R+A} + \frac{\alpha_\lambda}{1 - \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle S_\lambda} \rho_{\lambda TOC} + \frac{\beta_\lambda}{1 - \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle S_\lambda} \langle \rho_{\lambda TOC} \rangle,$$

где, $\rho_{\lambda TOA} = \frac{\pi L_{e\lambda TOA} d^2}{E_{\lambda TOA} \mu_0}$ – альbedo на верхней границе атмосферы; $\rho_{\lambda R+A}$ – альbedo атмосферы без учета влияния Земли; α_λ и β_λ – модельные параметры атмосферы для заданного спектрального канала; $\langle \rho_{\lambda TOC} \rangle$ – среднее значение альbedo пикселя в заданном спектральном канале, отнесенном к Земле; S_λ – сферическое альbedo атмосферы.

Параметры α_λ и β_λ подразумевают необходимость заранее выстроенной математической модели атмосферы (АОТ, содержание воды в атмосфере и рэлеевское рассеяние), на основе которой и будут рассчитываться альbedo поверхности Земли.

Реализации АК. Выше рассмотренная методика расчета может использоваться для проектирования индивидуальной модели АК конкретной системы ДЗЗ. На ее основе были разработаны как простые, так и более сложные методы.

Существуют стандартизированные методы АК, указанные в ГОСТ Р 70027–2022 [3]. Их разделяют на следующие типы и подтипы:

1) эмпирическая АК:

способ коррекции по плоскому полю. Требуется наличие плоского спектра на заданном фрагменте съемки. Недостаток: присутствие на заданном фрагменте съемки участков с резкими перепадами в яркостях отдельных каналов приводит к ошибке в коррекции;

способ коррекции по методу эмпирической линии. Требуется наличие известных истинных значений яркости темного и светлого объектов;

коррекция по темному объекту. Требуется наличие на заданном фрагменте съемки темных объектов. Недостаток: возможное появление перекорректированных данных.

2) АК на основе физической модели. Требуется наличие параметров атмосферы на момент съемки.

Каждый из эмпирических методов является упрощенным и не предназначен для обеспечения высокой точности коррекции.

АК основанная на физической модели, часто используется для формирования более сложных программных модулей, например:

Для КА ДЗЗ Landsat используется известный метод АК разработанный Чавезом в 1988 году [4], который реализован во внутреннем пакете Land-

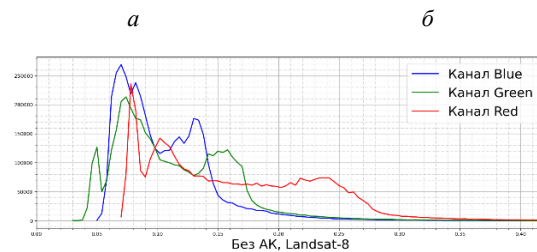
sat для обработки ЦИ уровня L1 [5]. Данная методика использует заранее заданные параметры атмосферы, что сильно сказывается на точность корректирования.

Для обработки ЦИ WorldView-3 используют запатентованный метод АК DG AComp [6]. Данный модуль смягчает эффекты рассеивания световой волны, вызванного дымкой, водяными парами и твердыми частицами в атмосфере.

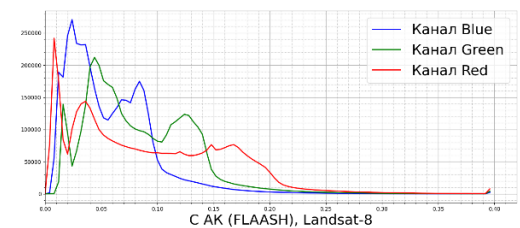
Для КА ДЗЗ Sentinel-2 существует отдельный модуль АК Sen2Cor, который реализован в ПО SNAP [7]. Данный модуль является международно-признанным и может использоваться в качестве эталона сравнения с заранее установленными точностными рамками.

Методы АК Sentinel-2 и WorldView-3 основаны использованием как информации об атмосфере полученной ОЭА, так и априорно заданных параметров об атмосфере, что усложняет процесс АК.

Вышеизложенные модули являются частными проектами, которые используются для определенного вида аппарата. В качестве альтернативы, были разработаны отдельно существующие ПО, где реализованы модули АК. К таким модулям можно отнести: ПО ENVI с встроенным модулем атмосферной коррекции FLAASH [8], модуль 6S и модуль ATCOR [9].



а



б

а – без АК; б – с АК; в – гистограммы альbedo Земли без АК; г – гистограммы альbedo Земли с АК

Рисунок 2 – Пример работы метода АК

Модуль FLAASH является наиболее распространенным инструментом АК. Им могут пользоваться для обработки ЦИ таких аппаратов ДЗЗ, как: Landsat, Sentinel-2, KOMPSAT, IKONOS, GeoEye, WorldView и других систем. В нем реализовано атмосферное корректирование как мультиспектральных, так и гиперспектральных снимков. В случае обработки пользовательской ЦИ, имеется возможность создания собственных файлов внутри программы и изменения настроек АК. Даже если рабочей информации по спектральному каналу будет не хватать для проведения полной АК, ее можно будет заменить на приблизительно равную с учетом потерь по точности коррекции.

Пример работы Модуля FLAASH при обработке снимка Landsat-8 приведен на рисунке 2. Как видно по гистограммам, при проведении АК спектральная информация в разных каналах меняется в зависимости от степени влияния соответствующих им факторов.

Таким образом, каждый из рассмотренных и допустимых для использования методов АК имеет привязку к специальным рабочим каналам ОЭА и требуют знания параметров атмосферы.

Требования к разработке метода АК. Учитывая вышеизложенные факторы можно вывести первичные требования для реализации АК при проектировании новой ОЭА ДЗЗ:

- использовать при съемках ОЭА дополнительный прибор (зондировщик), по информации, полученной с которого, можно определить параметры атмосферы;
- нестабильными параметрами атмосферы являются АОТ и концентрация паров воды. В соответствии с этим сформировать спектральные диапазоны для зондировщика;
- разработать метод определения по информации с зондировщика нестабильных параметров атмосферы (АОТ и концентрация паров воды);
- разработать метод использования полученных параметров при АК снимков ОЭА;
- внедрить в ПО обработки снимков ОЭА разработанный модуль АК для синхронной коррекции.

Вывод. Таким образом, были рассмотрены общая концепция АК и наиболее распространенные способы проведения АК. Предлагается продолжение работ по разработке нового метода АК с использованием результатов съемки мультиспектрального прибора, работающей синхронно с целевой аппаратурой космического аппарата.

Литература

1. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. 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: ГОСТ Р 59759-2021. – Введ. 01.05.2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 24 с.
3. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Виды атмосферной коррекции: ГОСТ Р 70027-2022. – Введ. 01.09.2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с.
4. Chavez, P. S. Image-based atmospheric corrections – Revisited and Improved / P. S. Chavez // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1996. –V. 62, № 9. – P. 1025–1036.
5. Забелин, С. А. Методика атмосферной коррекции снимков Landsat / С. А. Забелин, А. Д. Тулегулов, // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. – 2011. – № 2 (81). – С. 147–154.
6. Smith, M. J. (2015). A comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC atmospheric compensation algorithms using WorldView-2 Imager, Environmental Science, Engineering. – 2015.
7. Main-Knorn M. Sen2Cor for Sentinel-2, in: Image and SignalProcessing for Remote Sensing XXIII, SPIE Digital Library, – 2017.
8. Болсуновский, М. А., Атмосферная коррекция в ПО ENVI. Модуль FLAASH / М. А. Болсуновский, А. С. Черепанов– М.: Геопрофи, 2006 – 3 с.
9. Benthic Habitat Mapping Using Multispectral High-Resolution Imagery: Evaluation of Shallow Water Atmospheric Correction Techniques, Sensors / E. Francisco [et al.]. – NIH, 2017, – 23 p.