ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.Р. Покровская, А.С. Зотов

Московский физико-технический институт
pokrovskaya@phystech.edu, zotov.sa@mipt.ru

Аннотация. В работе дан обзор гиперспектральных приборов, установленных на бортах космических аппаратов, в том числе и отечественного производства. Представлено сравнение основных программных продуктов для обработки гиперспектральных снимков применительно к возможному перечню решаемых задач. Описана методика оценки оперативности гиперспектрального комплекса, который планируется установить на борт МКС в 2020 году. В заключение, для демонстрации примера реализации потенциальных возможностей прибора проводится неконтролируемая классификация снимка местности, над которой будет пролетать МКС с прибором на борту. В качестве пробного был выбран снимок комплекса Hyperion, и проведена его обработка в двух программных продуктах: ERDAS Imaging 2013 и в отечественном аналоге Albedo с последующим сравнительным анализом.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гиперспектральная аппаратура, гиперспектральная съемка, космический аппарат, международная космическая станция, геоинформационная система.

Введение

Гиперспектральная съемка как технология дистанционного зондирования земли (далее ДЗЗ) начала успешно развиваться в 80-х годах прошлого столетия, когда появилась техническая возможность принимать, обрабатывать и передавать большие объемы информации. Востребованность в использовании гиперспектральной информации постепенно увеличивалась по мере улучшения характеристик разрабатываемой аппаратуры и снижения ее веса. Это отчасти связано с тем, что гиперспектральные данные, по сравнению с классической информацией ДЗЗ, содержат сведения даже о незначительных изменениях физико-химических параметров объектов земной поверхности.

Использование в космосе гиперспектральных камер позволяет оперативно решать множество задач по изучению поверхности Земли: картографирование сельскохозяйственных культур, проведение геологических и геологоразведочных исследований; мониторинг природных катастроф и многие другие.

Гиперспектрометры, установленные на борту космических аппаратов (далее КА), являются важным элементом в задачах дистанционного зондирования Земли, обеспечивая получение информации о типе и состоянии объектов исследуемой поверхности. За последние годы в мире было создано несколько десятков гиперспектрометров авиационного и космического базирования, их основные характеристики представлены в таблице 1.

Большинство упомянутых в таблице 1 КА произведены и обслуживаются различными министерствами и ведомствами США. Из приведенных приборов только два аппарата разработаны в России несмотря на то, что разработка отечественной гиперспектральной аппаратуры космического базирования началась практически параллельно с разработкой зарубежных аналогов. В настоящее время российские гиперспектральные данные представлены преимущественно материалами, полученными с авиационных носителей. ГСА космического базирования появились в России относительно недавно: на малом космическом аппарате МКА-ФКИ «Зонд-ПП» (головной разработчик – НПО им. С. А. Лавочкина, разработчик ГСА – АО «НПО Лептон») и на космическом аппарате (КА) «Ресурс-П» (головной разработчик – Самарский ракетно-космический центр «Прогресс», разработчик ГСА – Красногорский завод им. С. А. Зверева). Некоторые из представленных гиперспектральных аппаратов (таблица 1) имеют обширную библиотеку снимков в открытых источниках, например, USGS (The United States Geological Survey [1]) содержит снимки, полученные гиперспектральным комплексом Hyperion.

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики гиперспектральных комплексов, упомянутых в таблице 1.

В настоящее время действующие отечественные системы уступают зарубежным аналогам как по масса-габаритным, так и по оперативным возможностям. Именно поэтому, несколько лет назад МФТИ

совместно с ПАО «РКК «Энергия» начаты работы по созданию нового отечественного гиперспектрального комплекса, который планируется в 2020 году разместить на 9-м иллюминаторе Международной космической станции (далее МКС). Ожидаемые характеристики прибора представлены в таблице 3.

Таблица 1

Спутник/станция	ГСА	Год запуска, г	Текущая ситуация	Производитель	Высота над Землей (км)	Период обращения, мин
MightySat 2.1	FTHSI	2000	Миссия окончена	США	575	96
EO-1	Hyperion	2000	Миссия окончена	США	705	98,9
PROBA-1	CHRIS	2001	Миссия окончена	Бельгия	600	97
Ресурс-П	ГСА	2013, 2014 и 2016	Миссия окончена	Россия	468–487	94
ISS	HICO	2009	Миссия окончена	Япония	337–430	92
TERRA	ASTER	1999	Продолжает миссию	США	705	98,88
Envisat	MERIS	2002	Миссия окончена	ЕКА	790	100
EnMAP	HIS-VNIR	2017	Продолжает миссию	Германия	653	97
	HIS-SWIR					
IMS-1	HySi	2008	Миссия окончена	Индия	638	97
ISS	HISUI	2019	–	Япония	337–430	92
PRISMA	PRISMA	2018	–	Италия	615	98
HYPXIM-P		2021	–	Франция	660	–
МКА-ФКИ	ГСА	2012	Миссия окончена	Россия	815	98,9

Программные средства для обработки снимков ГСА

Получение гиперспектральных снимков дает возможность не только исследовать местоположение объектов, но и провести их более детальный анализ. Для этого недостаточно наличия только растрового изображения снимка и метаданных, полученных в результате обработки данных, полученных гиперспектрометром и МКС. Необходима их дальнейшая обработка специальным программным продуктом. Данные программы позволяют осуществлять ряд полезных функций над растровыми гиперспектральными изображениями: трансформация, анализ, тематическая обработка и т.д. Одними из основных программных продуктов, являются:

1) ENVI – серия программных продуктов, предназначенных для визуализации, анализа и обработки данных дистанционного зондирования [2]. ENVI состоит из нескольких специализированных программ, которые позволяют проводить анализ любых данных изображений, полученных в результате ДЗЗ с помощью современных методов.

2) Erdas Imagine – программный пакет для обработки изображений [3]. Данная программа позволяет пользователям обрабатывать как геопростран-

ственные, так и другие снимки, а также векторные данные. В частности, Erdas также может обрабатывать гиперспектральные изображения с различных датчиков, при этом работая в режиме инструментального средства, позволяющего производить многочисленные преобразования растровых картографических изображений.

3) Albedo – программное обеспечение для обработки гиперспектральных данных. В этой программе можно выполнить полный цикл обработки данных – от исходных снимков до векторных карт. Albedo имеет очень понятный интерфейс управления данными [4].

В заключение этого раздела хотелось бы отметить, что не все расширения файлов, которые формируются при гиперспектральной съемке, доступны к обработке в любом из вышеописанных пакетов. Более того, основной проблемой, которая обычно подталкивает проектировщиков аппаратуры инициировать разработку специального программного обеспечения, является уникальность каждого из приборов (собственные тактические характеристики, специфические конструкции оптико-электронного тракта, отсутствие универсальной спектральной базы данных).

Таблица 2

ГСА	Количество спектральных каналов	Спектральный диапазон, нм	Пространственное разрешение, м	Спектральное разрешение	Ширина полосы съемки, км	Вес ГСА, кг	Скорость передачи данных, Мбит/с
FTHSI [5]	256	350–1050	30	1,7	7–29	20,45	20
Hyperion [6]	220	400–2500	30	10	7,5	49	150
CHRIS [7]	19/63	400–1050	17/34	1,25–11	13	15	–
ГСА (Ресурс-П) [8]	96–255	400–1100	25–30	5–10	25	–	–
HICO [9]	102	380–960	92	5,7	42	43	–
ASTER [10]	14	520–860; 1600–2430; 8125–11650	15; 30; 90	–	60	–	62
MERIS [11]	16	412–1050	300	2,5–30	1,2/0,3	200	50
HSI-VNIR [11]	96	420–1000	30	5–10	30	325	860
HSI-SWIR [12]	136	900–2450	30	10–20	30		860
HySi [13]	64	421–964	500	20	129,5	3,4	32
HISUI [14]	185	400–2500	30	10–15	15	–	400
PRISMA [15]	237	400–2500	30	12	30	8	155

Таблица 3

Наименование камеры	ГСК-1	ГСК-2
Спектральная полоса, мкм	0,47–0,90	0,90–1,60
Количество спектральных каналов, не менее	90	90
Спектральное разрешение, нм, не более	25	30
Длина маршрута съемки, км	500	500
Разрешение в нади́р (проекция пикселя), м, не более	45	70
Угол поля зрения, грд, не менее	3,5	3,5

Повышение информативности получаемых данных

В рамках подготовки к эксперименту была разработана программа для определения возможности съемки выбранной области. Использовалась методика оценки оперативности выполнения тематической задачи с помощью гиперспектрометра космического базирования.

Суть метода заключается в моделировании движения искусственного спутника Земли, полосы захвата гиперспектрометра, исследуемой области, а также внешних условий, при которых осуществляется съемка. Среди этих условий, существенно влияющих на качество гиперспектральных снимков, зенитный угол Солнца и облачность.

Движение ИСЗ моделируется с помощью широко используемой модели SGP4 [16]. Зенитный угол Солнца вычисляется по координатам исследуемой точки и времени, задается допустимый диапазон зенитного угла Солнца, при котором можно производить съемку. Балл облачности задается в каж-

дый момент времени, когда ИСЗ пролетает близко к исследуемому полигону: случайно, в соответствии с некоторым распределением вероятности, которое формируется по данным климатических наблюдений в заданной области, задается некоторый максимально допустимый балл облачности.

Оперативность характеризуется показателем оперативности – средним временем выполнения поставленной задачи. При этом считается, что задача выполнена, когда некоторый процент площади заданной области попал в ПЗ гиперспектрометра при допустимых условиях наблюдения. Для вычисления показателя оперативности производится моделирование работы гиперспектрометра на протяжении долгого времени и сбор данных о ходе выполнения задачи. Показатель оперативности вычисляется на основе накопленных данных.

Методика включает следующие шаги: разбиение заданной области на сегменты для того, чтобы было возможно определить, какие части области были отсняты; построение траектории движения ИСЗ

ДЗЗ с помощью модели SGP4 с некоторым выбранным шагом времени между заданными начальным и конечным временем моделирования; моделирование внешних условий наблюдения тестовых полигонов для каждого отдельного пролета над полигонами; проверка соответствия внешних условий наблюдения допустимым при решении выбранной тематической задачи; проверка того, какие сегменты полигонов захватываются ПЗ ГСК; накопление данных на каждой итерации о ходе выполнения тематической задачи, то есть о том, когда и сколько информации надлежащего качества было собрано и в какое время задача была выполнена; вычисление показателя оперативности на основе собранных данных.

Виды классификации

Современные системы ДЗЗ, в частности, гиперспектральные, обладают различным количеством спектральных каналов (таблица 2), что затрудняет проведение визуальной классификации изображений, с целью выделения объектов на изображении. Поэтому алгоритмы классификации реализованы в программах по обработке гиперспектральных снимков.

Под классификацией изображения автором понимается процесс количественного отбора данных изображения и группирования точек или частей изображения в классы, предназначенные для представления различных физических объектов или типов [17]. Результатом выполнения процесса классификации изображения будут являться карты классификации. Известны два типа классификации:

- классификация с обучением – контролируемая классификация;
- классификация без обучения – неконтролируемая классификация.

В данной работе использован простейший алгоритм неконтролируемой классификации, чаще называемый алгоритмом кластеризации. Кластерный анализ позволяет выделять области с неконтрастной по спектральной яркости структурой, например, растительность, открытые почвы, вода, облака и другие объекты. Самыми распространенными алгоритмами неконтролируемой классификации являются методы K-Means (K внутригрупповых средних) и ISODATA. Главное их отличие заключается в том, что на стадии инициализации алгоритма ISODATA происходит распределение пикселей, в то время как для алгоритма K-Means происходит распределение значений математических ожиданий. В данной работе будет применяться алгоритм K-Means.

Неконтролируемая классификация является довольно объективным процессом, но имеет несколько важных недостатков. Например, одни и те же объекты могут попасть в разные кластеры из-за

условий освещения, а разные объекты – оказаться в одном кластере из-за одинаковой яркости.

Проведение неконтролируемой классификации снимка Hyperion в программах Erdas Imaging 2013 и Albedo

В качестве примера, проведем неконтролируемую классификацию методом K-средних снимка, сделанного 9 июля 2016 года с помощью гиперспектрального прибора Hyperion (данные прибора представлены в таблицах 1 и 2).

Снимок был сделан в районе Старой Калитвы, Воронежская область. Обрезка снимка произведена в районе реки Дон, данная область содержит как индустриальные объекты, так и лес, почву, воду, траву, что должно отобразиться при проведении кластеризации на карте классификации.

После обработки получаем растровое изображение в «естественных цветах» – рис.1 (как правило, используются длины волн 600 нм для красного цвета, 550 нм для зеленого, 440 нм для синего, в нашем случае применяют ближайшие к данным значениям каналы). Далее осуществим экспорт данных в программу Erdas Imaging 2013 (далее Erdas) (– рис.1.)

Теперь необходимо просмотреть снимки по всем каналам и отобрать те, на которых наиболее четко видны различия между объектами. Проведя данный отбор в программе Albedo, получаем, что наиболее информативными являются каналы 15–62, 87–102, 106–124, 139–168, 193–195 из 242. В результате отбора сформировалось подмножество из 136 каналов. Аналогичную процедуру проводим в программе Erdas Imaging 2013.

Так как при неконтролируемой классификации стремятся сохранить о снимке максимальное количество полезной информации при минимизации числа каналов, то следующим важным действием является вычисление главных компонент (что еще больше сокращает число каналов). Затем производят неконтролируемую классификацию. В программе Albedo вычисление главных компонент произведено на новом растровом изображении (136 каналов). В результате обработки число каналов уменьшилось до 25 штук. Далее осуществляем функцию кластеризации (неконтролируемой классификации). Берем самый простой случай, предположительно разбиваем снимок на 5 классов: вода, почва, трава, лес, индустриальные объекты. В результате получаем карту классификации – рис. 2. Стоит отметить, что процесс кластеризации не совсем точно соответствует разбивке на классы: вода, почва, трава, лес, индустриальные объекты, – но многие из перечисленных объектов становятся разделены. Например, на получившейся карте вода четко выделилась в отдельный класс,

а вот часть лесистой местности не совсем разделилась с травой, промышленные объекты не попали в отдельный класс. После отбора наиболее информативных каналов в программе Erdas и проведения неконтролируемой классификации по пяти классам мы получаем еще одну карту классификации снимка для сравнения с предыдущей – рис. 2.

программы в отдельный класс эту область не выделили (черный цвет). При этом, как было сказано ранее, именно неконтролируемая классификация является первой ступенью в оценке снимка, она позволяет провести разбиение снимка на классы, чтобы в дальнейшем дает возможность выявить интересные исследователя объекты и области.

Рис. 1 Растровое изображение снимка *Hyperion* (242 канала): слева в программе *Albedo* после импорта, представленное в «естественных цветах» (Red=25 канал, green=21 канал, blue=10 канал), справа в программе *Erdas Imaging 2013* после экспорта из программы *Albedo* (Red=25 канал, green=21 канал, blue=10 канал)

Рис. 1 Растровое изображение снимка *Hyperion* (242 канала): 1) слева в программе *Albedo* после импорта, представленное в «естественных цветах» (Red=25 канал, green=21 канал, blue=10 канал); 2) справа в программе *Erdas Imaging 2013* после экспорта из программы *Albedo* (Red=25 канал, green=21 канал, blue=10 канал)

Сравнивая карты классификации (рис. 2), можно заметить, что оба программных продукта дают не сильно отличающиеся результаты по выделению водных поверхностей (синие области) в отдельные классы. Что касается лесистых и травяных поверхностей, то здесь имеются отличия (темно и светло-зеленые участки). При этом на изображении присутствовала часть города Старая Калитва, но обе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Потенциально возможно использование прогностического программного обеспечения для планирования эксперимента и разработанного в МФТИ пакета *Albedo* – для проведения базовой (начальной) обработки снимков непосредственно на борту МКС без привлечения узкого специалиста.

Список литературы

1. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
2. Горбачева Е.Н. Программный комплекс ENVI – профессиональное решение для комплексной обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радарных данных //Геоматика. – 2013. – №. 2. – С. 50.
3. <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-image>
4. <http://geo.mipt.ru/albedo/>
5. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mightysat>

6. *Folkman M. A. et al.* EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration //Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere. – International Society for Optics and Photonics, 2001. – Т. 4151. – С. 40–52.
7. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-1#sensors>
8. *Кирилин А.Н. и др.* Космический аппарат «Ресурс-П» //Геоматика. – 2010. – Т. 4. – №. 9. – С. 23.
9. *Korwan D.R. et al.* Laboratory characterization of the Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) //Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. – IEEE, 2009. – Т. 2. – С. II-69-II-72.
10. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terra#mission-status>
11. *Bourg L., Delwart S.* MERIS instrument calibration //Second MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation Workshop, Frascati, Italy. – 2006. – С. 20–24.
12. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/e/enmap>
13. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ims-1>
14. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-hisui>
15. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/prisma-hyperspectral>
16. *Hoots F. R., Roehrich R.L.* Models for propagation of NORAD element sets. – AEROSPACE DEFENSE COMMAND PETERSON AFB CO OFFICE OF ASTRODYNAMICS, 1980.
17. *Зубков И.А., Скрипачев В.О.* Применение алгоритмов неконтролируемой классификации при обработке данных ДЗЗ //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. 4. – №. 1. – С. 57–62

A STUDY OF THE POTENTIAL CAPABILITIES OF A RUSSIAN ISS-BASED IMAGING SUITE FOR HYPERSPECTRAL SENSING OF EARTH'S SURFACE

A.R. Pokrovskaya, S.A. Zotov

Moscow institute of physics and technology
pokrovskaya@phystech.edu, zotov.sa@mipt.ru

Abstract. This paper reviews spaceborne hyperspectral devices, including those produced in Russia. We compare the main software solutions for hyperspectral image processing with regard to a possible set of tasks. The review is followed by a description of the framework for assessing the efficiency of the hyperspectral suite to be installed on the ISS in 2020. We conclude by giving an example of the implementation of the potential device capabilities by performing unsupervised classification of an image of the terrain that the ISS will fly over carrying the new imaging system onboard. A Hyperion image was chosen as the example and processed using two software tools: ERDAS Imaging 2013 and its Russian analogue Albedo. A comparative analysis of the resulting data is presented.

Key words: remote sensing of the Earth, hyperspectral equipment, hyperspectral survey, space vehicle, international space station, geoinformation system.

References

1. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
2. Gorbacheva E.N. The ENVI program complex is a professional solution for complex processing of multispectral, hyperspectral and radar data // Geomatics. – 2013. – No. 2. – P. 50.
3. <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>
4. <http://geo.mipt.ru/albedo/>
5. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mightysat>
6. Folkman M.A. et al. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration // Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere. – International Society for Optics and Photonics, 2001. – T. 4151. – P. 40–52.
7. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-1#sensors>
8. Kirilin A.N., etc. Spacecraft “Resource-P” // Geomatics. – 2010. – T. 4. – No. 9. – P. 23.
9. Korwan D.R. et al. Laboratory characterization of the Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. – IEEE, 2009. – T. 2. – C. II-69-II-72.
10. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terra#mission-status>
11. Bourg L., Delwart S. MERIS instrument calibration // Second MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation Workshop, Frascati, Italy. – 2006. – C. 20–24.
12. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/e/enmap>
13. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ims-1>
14. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iss-hisui>
15. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/prisma-hyperspectral>
16. Hoots F.R., Roehrich R.L. Models for propagation of NORAD element sets. – AEROSPACE DEFENSE COMMAND PETERSON AFB CO OFFICE OF ASTRODYNAMICS, 1980.
17. Zubkov I.A., Skripachev V.O. Application of uncontrolled classification algorithms for RS data processing // Modern problems of Earth remote sensing from space. – 2007. – T. 4. – No. 1. – P. 57–62.