

УДК 629.78

В. Н. Астапенко, В. И. Иванов, П. П. Хорольский

Институт технічної механіки НАН та НКА України, Дніпропетровськ

Обзор состояния и перспектив спутниковой гиперспектральной съемки

Надійшла до редакції 07.02.02

Подано огляд стану, шляхів використання та перспектив розвитку гіперспектральної зйомки з космосу.

Запуски с конца 1990-х гг. узкоспециализированных малых коммерческих КА наблюдения Земли стали возможными благодаря использованию съемочных камер высокого разрешения, созданных с применением новейших военных технологий.

Одной из таких технологий является гиперспектральная съемка, или видеоспектрометрирование, появившаяся в результате эволюционного развития многоспектральной съемки. Путем разделения изображения на сотни каналов формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок (пиксел) характеризуется собственным спектром. Два измерения такого изображения соответствуют пространственному изображению объекта съемки на плоскости, а третье — частоте спектра принятого излучения.

Коротко об истории развития разработок в этой области в СССР. В восьмидесятые годы СССР был близок к созданию гиперспектральной аппаратуры. Так, на КА «Океан-О1» № 3, запущенном в 1988 году, был испытан спектрополяриметр «Трассер-НХМ». В 1999 г. был запущен украинско-российский КА «Океан-О», на котором установлен поляризационный спектрорадиометр «Трассер-О». Оба прибора были разработаны во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических радиоизмерений Госстандарта СССР и осуществляли съемку вдоль трассы движения спутника, то есть не имели системы пространственной развертки. Основным элементом этих приборов являлся акусто-оптический фильтр, обеспечивающий сканирование

по спектру в 31 канале в диапазоне $\lambda = 0.4...0.8$ мкм со спектральным разрешением $\Delta\lambda = 3...12$ нм. При этом обеспечивался выбор одного из двух видов поляризации выходного сигнала. Созданию полноценного видеоспектрометра помешало отсутствие средств и распад СССР [18].

Первым иностранным КА, запущенным на орбиту 23.08.1997 г. с гиперспектральной аппаратурой, был американский спутник «Lewis». Однако спустя четверо суток после запуска из-за отказа бортового служебного комплекса связь с КА прекратилась.

Коммерческий КА «OrbView-4», оснащенный гиперспектральной съемочной аппаратурой ВВС США «Warfighter-1», потерян при аварийном запуске 21.09.2001 г.

В начале 2002 г. на орбите успешно функционировали три КА с гиперспектральной аппаратурой: американский КА наблюдения Земли «Earth Observing-1», запущенный 21.11.2000 г., военный экспериментальный КА ВВС США «MightySat II.1», выведенный на орбиту 19.07.2000 г., европейский научный КА PROBA, запущенный 22.10.2001 г.

В стадии разработки находится гиперспектральная аппаратура для КА ARIES-1 (Австралия), «SkyMed Cosmo» (Италия), NEMO (США), «Монитор-Э» и «Астрогон» (Россия).

Формирователь гиперспектральных изображений HSI (Hyper Spectral Imager) изготовлен фирмой TRW для КА «Lewis». HSI имел 384 спектральных канала в диапазоне $\lambda = 0.4...2.5$ мкм, пространственное разрешение 30 м, спектральное — $\Delta\lambda = 5$ нм, ширину полосы обзора 7.7 км с высоты

523 км. На КА был также установлен линейный эталонный построитель спектрального изображения LEISA (Linear Etalon Imaging Spectral Array) для картирования в полосе обзора шириной 77 км с пространственным разрешением 300 м спектров подстилающей поверхности и характеристик атмосферы, в частности для оценки облачности при съемке HSI [8, 9, 11, 22].

Гиперспектральный построитель изображений с фурье-преобразованием сигнала FTHSI (Fourier Transform Hyperspectral Imager) разработан компанией «Kestrel Corp.» и испытан на борту военного космического аппарата США «MightySat II.1». FTHSI имеет 256 спектральных каналов в диапазоне $\lambda\lambda = 0.45...1.05$ мкм. Спектральное разрешение равно 1.7 нм при длине волны $\lambda = 450$ нм. Ширина полосы обзора с высоты 547 км составляет 13 км, длина полосы обзора — 20 км. Отношение уровня полезного сигнала к шумовому — 73. Система включает телескоп с тремя зеркалами, создающими изображения в видимом и двух ИК-диапазонах. В качестве регистрирующего устройства используется ПЗС-матрица размером 1024×1024 пиксела.

Основная идея, положенная в основу создания FTHSI, состоит в том, что каждый объект характеризуется присущим ему спектром. Однотипные объекты обладают идентичными или очень близкими спектрами. Техническим преимуществом фурье-систем по сравнению с рассеивающими является возможность получения полного спектра без какой-либо задержки во времени, а также разделение пространственных и спектральных характеристик наблюдаемых объектов.

Предполагается, что работа КА «MightySat II.1» синхронизировалась с работой КА оптико-электронной разведки США типа KH-11. Проведение одновременной съемки одних и тех же объектов экспериментальной гиперспектральной камерой и штатной разведывательной аппаратурой позволило выполнить ее тестирование [4, 16, 20, 22].

Камера гиперспектральной съемки «Hyperion» разработана фирмой TRW по заказу геологической службы США USGS (U.S. Geological Survey) и установлена на КА «Earth Observing-1» (EO1), созданном NASA по программе «New Millennium». Камера «Hyperion» обеспечивает получение изображений с пространственным разрешением 30 м в 220 спектральных каналах в пределах $\lambda\lambda = 0.4...2.5$ мкм в полосе шириной 7.5 км и длиной 100 км.

На борту EO-1 установлена аппаратура LAC (Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector) для коррекции изображений, искажаемых поглощением и рассеянием света в атмосфере — главным образом из-за водяного пара. Это гиперспектральный инструмент умеренного

пространственного разрешения. Рабочие диапазоны выбраны в пределах $\lambda\lambda = 0.85...1.5$ мкм, чтобы обеспечивать оптимальную коррекцию снимков с высоким пространственным разрешением. Коррекция данных осуществляется за счет измерения фактических, а не модельных уровней поглощения. Ожидается, что работа LAC позволит повысить точность оценки отражающих свойств поверхности. Такая аппаратура может быть установлена на любом научном или коммерческом аппарате ДЗЗ.

Оценка информативности различных участков спектра осуществлялась при обработке изображений, полученных при одновременной съемке тестовых объектов гиперспектральной и традиционной оптической аппаратурой. КА EO-1 вел съемку совместно с КА «Landsat-7» и «Terra» (EOS AM-1).

После начала военной операции в Афганистане гиперспектральные снимки с КА были использованы армией США для выявления целей и оценки результатов бомбовых ударов. Стоимость архивных гиперспектральных изображений установлена в 500 дол. В случае съемки заказанных объектов стоимость изображения составит 2000 дол. [21, 23, 24].

Компактный спектрометр высокого разрешения CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) установлен на миниспутнике PROBA (Project for On-Board Autonomy), который предназначен для отработки автономного управления научной аппаратурой. КА массой 94 кг разработан бельгийской компанией «Verhaert Design» and «Development» по заказу Европейского космического агентства ESA.

Спектрометр CHRIS разработан и изготовлен британской фирмой «SIRA Electro-Optics» и предназначен для съемки Земли в интересах землепользования, определения биохимических (количество хлорофилла) и биофизических свойств поверхности. Он также используется для изучения распределения аэрозолей в атмосфере и для исследований в области точной атмосферной коррекции данных спутниковой съемки. Наконец, CHRIS позволяет получать гиперспектральные наборы данных по заданным районам при съемке под различными углами зрения.

CHRIS измеряет отражающую способность поверхности под различными углами в 19 спектральных каналах в видимом и ближнем ИК-диапазонах в пределах $\lambda\lambda = 0.45...1.05$ мкм, имея пространственное разрешение 25 м в надире и спектральное разрешение от 2 до 10 нм. Ориентацию прибора на объект съемки под заданными углами зрения обеспечивает спутник. Постановщик эксперимента указывает расположение объекта съемки и время на-

блюдений, а бортовой компьютер самостоятельно планирует и обрабатывает программу съемки. Данные сбрасываются на Землю и после дополнительной обработки представляются в виде двунаправленной функции распределения отражения BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) для выбранных полигонов на земной поверхности [7].

Космический аппарат «OrbView-4», потерянный при аварийном запуске, предназначался для съемки поверхности Земли с высоким разрешением на коммерческой основе. Спутник принадлежал американской компании «Orbital Imaging Corp.» (OrbImage), был разработан и изготовлен фирмой «Orbital Sciences Corp.» (OSC) — одним из совладельцев OrbImage. «OrbView-4» был оснащен панхроматической камерой, позволяющей получать снимки с разрешением 1 м и мультиспектральной камерой, позволяющей получать снимки с разрешением 4 м. Исследовательской лабораторией им. Филиппа ВВС США AFRL (Air Force Research Laboratory) в состав КА был включен гиперспектральный прибор с апертурой 0.45 м, 200 и 80 спектральными каналами в диапазонах $\lambda\lambda = 0.45...2.5$ и $3...5$ мкм соответственно, пространственным разрешением 8 м и шириной полосы обзора 5 км, разработанный в соответствии с программой «Warfighter-1».

Военное применение гиперспектральных данных заключается в идентификации различных объектов по их уникальным сигнатурам (спектрам). «Warfighter-1» предназначался для проверки ценности таких данных и приобретения необходимого опыта. Для проекта «Warfighter-1» компания OSC разработала мобильную наземную станцию приема [2, 6].

Создание видового спектрометра для получения изображения прибрежных зон океана COIS (Coastal Ocean Imaging Spectrometer) ведется Исследовательской лабораторией ВМС США NRL (Naval Research Laboratory) в рамках программы HRST (Hyperspectral Remote Sensing Technology — гиперспектральная технология дистанционного зондирования). Прибор планируется установить на КА двойного назначения NEMO (Navy Earth Map Observer) — аппарат наблюдения и картографирования Земли ВМС для решения целевых задач как флота, так и коммерческих заказчиков. ВМС будет предоставлен приоритетный доступ в течение 25 % рабочего времени.

Этот аппарат предназначен для обеспечения штабов ВМС информацией о прибрежных зонах, особенностях морского дна и других показателях океанской среды на расстоянии до 50 км от береговой линии (течениях, температуре, характеристиках

волн, планктоне, биолюминесценции, взвешенных примесях, растворенных органических веществах). Предполагается обнаружение мин, подводных лодок и других устройств, создающих угрозы кораблям.

Спектрометр COIS обеспечивает пространственное разрешение 30 и 60 м и спектральное разрешение 10 нм в 200 спектральных каналах в видимом и ближнем ИК-диапазонах в пределах $\lambda\lambda = 0.4...1.0$ мкм и в коротковолновом ИК-диапазоне в пределах $\lambda\lambda = 1.0...2.5$ мкм. Величина отношения «сигнал/шум» выбрана на уровне не менее 200 с учетом наблюдения поверхности океана с коэффициентом отражения менее 5 %. Потребляемая мощность спектрометра COIS составляет 90 Вт, скорость передачи данных — 77 Мбит/с, масса — 25 кг, ширина полосы съемки — 40 км. При разрешении 60×60 м COIS сможет снять за один виток полосу общей длиной 8000 км, а в режиме разрешения 30×30 м — девять полос длиной по 200 км.

Разработчиком и изготовителем КА является фирма «Space Systems/Loral», спектрометра — фирма «Science Applications International Corp.» Эксплуатацией системы будет заниматься компания «AlliedSignal Corp.», а фирма «Applied Coherent Technology Corp.» обеспечит обработку полученных со спутника изображений.

Получаемые гиперспектральные данные будут передаваться на станции в Аляске и в Норвегии. Ожидается, что основными сферами коммерческого использования поступающих данных будут разведка полезных ископаемых, экологические исследования, сельское хозяйство и тектонические исследования.

Опубликован перечень военных пользователей системы NEMO, в который входят Военно-морской океанографический центр, Центр боевого обеспечения, Центр воздушной войны ВМФ, Центр подводной войны ВМФ, Центр войны на поверхности ВМФ и Центр систем Командования космических и боевых морских систем.

ВМС вынуждены отложить на неопределенный срок запланированный еще на 2000 г. запуск КА NEMO в связи с тем, что официальный партнер по проекту фирма STDC («Space Technology Development Corp.») не обеспечила необходимое финансирование. Новым партнером стала фирма ESSI («Earth Search Sciences Inc.», МакКолл, штат Айдахо), занимающаяся картографированием ресурсов Земли с самолетов, которая не смогла также получить у инвесторов необходимые финансовые средства в размере 125 млн дол. Пока в активе исполнителя только 6 млн дол. Всего для разработки, развертывания и начала эксплуатации системы

NEMO требуется 250 млн дол. [2, 3, 10, 13, 14, 17, 19].

Видеоспектрометрический блок «Юкон-В» разработан российским научно-производственным предприятием АФАР. Функционально блок входит в состав разрабатываемого комплекса «Юкон—УВИТ», предназначенного для получения информации в УФ-, видимом и тепловом диапазонах спектра. Работает на основе акустооптического эффекта в видимом диапазоне $\lambda\lambda = 0.5...0.8$ мкм. Общее число каналов 256, из них программно выбирается от 10 до 100 каналов шириной от 4 до 8 нм. Пространственное разрешение при высоте орбиты 400 км составит 20 м, размер кадра на местности — 15×12 км, объем одного изображения — 45 Мбит. Масса блока — 1.5 кг.

Блок «Юкон-В» может быть установлен на служебном модуле российского сегмента МКС, на малых КА наблюдения Земли «Монитор-Э» разработки ГКНПЦ им. Хруничева или на КА «Кондор-Э» разработки НПО машиностроения [5].

Научно-техническим центром «Реагент» разработана гиперспектральная видеокамера, которая обеспечивает съемку местности в 700 спектральных каналах (возможно увеличение до 1000 каналов) с пространственным разрешением 5 м. Реализована возможность адаптивного управления информационными ресурсами камеры по спектральным и пространственным координатам. Программный комплекс системы управления обеспечивает выбор спектрального разрешения от 0.5 до 100 нм в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 0.2...0.9$ мкм и $1.0...1.4$ мкм, а также одного из двух видов поляризации сигналов. Для пространственно-частотного преобразования сигналов используются перестраиваемые акустооптические фильтры и микроканальные детекторы фотонов. Расчетная точность геометрической привязки изображений составляет 5 м. Масса съемочной аппаратуры составляет 4 кг, потребляемая мощность — 15 Вт. Система управления камеры позволяет осуществлять инструментальную и виртуальную стереосъемку.

Эта видеокамера предназначена для установки на миниспутнике «Астрогон», который разрабатывается НИИ электромеханики (г. Истра, Россия) по программе аэрокосмического мониторинга ОАО «Газпром».

Для отработки технологии гиперспектральной съемки создана авиационная камера, которая обеспечивает пространственное разрешение 12 м с высоты 1 км [5].

Разрабатываемый австралийский КА ARIES-1 (Australian Resources Information and Environment Satellite) предназначен для получения информации

о природных ресурсах и окружающей среде преимущественно для нужд горнодобывающей промышленности. На КА будет использована техника получения гиперспектральных изображений с разрешающей способностью 30 м в полосе обзора шириной 30 км в видимом, а также в ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах $\lambda\lambda = 0.4...2.5$ мкм, охватывающем 96 спектральных каналов.

Программа разрабатывается отделением исследований и разработки полезных ископаемых австралийской государственной научно-промышленной исследовательской организации CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), австралийским центром дистанционного зондирования ACRS (Australian Center for Remote Sensing) и фирмой «Auspace Ltd.» [1, 12, 24].

Выявленные при поиске характеристики гиперспектральной аппаратуры сведены в таблицу. В

Основные характеристики гиперспектральной аппаратуры

Аппаратура	$\lambda\lambda$, мкм	Количество каналов	Пространственное разрешение, м	$\Delta\lambda$, нм	Полоса обзора, км
HSI	0.4—2.5	384	30	5.0	7.7
FTHSI	0.45—1.05	256		1.7	13
«Hyperion»	0.4—2.5	220	30		7.5
CHRIS	0.45—1.05	19	25	2—10	
«Warfighter-1»	0.45—2.5; 3.0—5.0	200; 80	8		5
COIS	0.4—1.0	200	30, 60	10	40
«Юкон-В»	0.5—0.8	256	20	4—8	15
«Астрогон»	0.2—0.9; 1.0—1.4	700 (1000)	5	0.5—100	
ARIES-1	0.4—2.5	96	30		30

случае несовпадения значений в разных источниках приняты данные более свежих источников.

При съемке поверхности Земли методами дистанционного зондирования есть проблема коррекции изображений, искажаемых поглощением и рассеянием света в атмосфере.

В СССР и в США существовали различные подходы к решению этой проблемы. В США при определении передаточной функции атмосферы превалировали методы статистической обработки многолетних метеорологических данных для разных районов земного шара в определенные месяцы и недели года. Советские ученые считали, что передаточную функцию атмосферы для учета ее влияния на качество съемки необходимо измерять непосредственно во время съемки спектрометрической аппаратурой.

Так, на советском экспериментальном КА «Оке-

ан-Э», запущенном в 1980 г., был установлен спектрометр 174 K1, который имел 10 каналов в диапазоне $\lambda = 11...19$ мкм. С помощью этого прибора можно было восстанавливать профили температуры и влажности атмосферы, а также измерять уровень поглощения солнечного излучения углекислым газом [18].

Судя по тому, что на современных американских спутниках вместе с гиперспектральной аппаратурой устанавливается спектрометрическая аппаратура для измерения параметров атмосферы, похоже, что для гиперспектральной съемки американские исследователи будут применять приборные методы учета влияния атмосферы.

Применение гиперспектральной съемки весьма эффективно при решении большинства хозяйственных и военных задач.

Возможна классификация типов материалов на поверхности Земли в интересах сельского хозяйства, геологии, экологии. Возможно получение данных о составе и структуре покрытой растительностью поверхности. Среди гражданских областей применения можно отметить обнаружение и определение характеристик негативных воздействий на природную среду (химические выбросы, сточные воды и т. п.) либо повреждений сельскохозяйственных угодий в результате стихийных бедствий, нашествия вредителей и др.

Основной областью военного применения технологии гиперспектральной съемки является обнаружение и классификация замаскированных и задымленных целей при проведении войсковых операций или разведки. При разведке секретных объектов можно свести практически на нет проводимые мероприятия по маскировке. При этом не важно, что является предметом маскировки — техника, личный состав, сливы технических отходов производства или специальные сооружения.

Дешифрирование снимков, опознавание и выделение объектов на фоне ложных целей и помех облегчается при создании библиотек (баз данных) специфических спектров разведываемых объектов, поскольку каждый объект характеризуется присутствием только ему спектром.

Получение гиперспектральных изображений существенно расширяет номенклатуру и повышает качество услуг в области наблюдения Земли. Однако выдача частным фирмам лицензий на создание коммерческих КА наблюдения с высоким пространственным и спектральным разрешением оговарива-

ется условиями, ограничивающими или блокирующими передачу информации с таких аппаратов недружественным странам в случаях угрозы национальным интересам страны-владельца такого КА.

Руководство американской фирмы «Earth Search Sciences Inc.», специализирующейся в области аэрофотосъемки, считает, что только по программе NEMO можно обеспечить объем продаж гиперспектральных данных, поступающих из космоса, на уровне 1.5 млрд дол. в течение 7—10 лет. Круг возможных клиентов необычайно широк [15].

По оценкам экспертов до 70 % всех задач наблюдения Земли могут быть решены благодаря съемке с высоким спектральным разрешением, и только 30 % — за счет видовой информации с высоким пространственным разрешением [5].

1. АЭРОКОСМОС.—1999.—№ 3.—С. 41—50.
2. АЭРОКОСМОС.—1999.—№ 22.—С. 75—79.
3. Новости космонавтики.—1998.—№ 15.—С. 35.
4. Новости космонавтики.—2000.—№ 9.—С. 42—44.
5. Новости космонавтики.—2001.—№ 7.—С. 44.
6. Новости космонавтики.—2001.—№ 11.—С. 29—31.
7. Новости космонавтики.—2001.—№ 12.—С. 41—44.
8. Ракетная и космическая техника.—1994.—№ 34.—С. 12—14.
9. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 11.—С. 4.
10. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 14.—С. 12—13.
11. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 47.—С. 6.
12. Ракетная и космическая техника.—1997.—№ 51.—С. 89.
13. Ракетная и космическая техника.—1998.—№ 10.—С. 9.
14. Ракетная и космическая техника.—1999.—№ 27.—С. 5.
15. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 15.—С. 13.
16. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 42.—С. 78.
17. Ракетная и космическая техника.—2000.—№ 48.—С. 7.
18. Ракеты-носители и космические аппараты КБ «Южное» / Под ред. С. Н. Конохова. — Днепропетровск; ООО «Колорграф», ООО ПА «ТандемУ», 2001.—240 с.
19. Aviation Week & Space Technology. 12.04.1999.—P. 70.
20. Aviation Week & Space Technology. 14.08.2000.—P. 57.
21. Aviation Week & Space Technology. 21.01.2002.—P. 30.
22. Jane's Space Directory. 1997—1998 / Ed. Ph. Clark-Coulsdon, Surrey UK: Jane's, 1997.—P. 183, 428.
23. Space News.—20.11.2000.—P. 30.
24. Towards an Integrated Global Observing Strategy (1997 CEOS yearbook): Committee on Earth Observation Satellites. — P. 96, 101, 125.

REVIEW OF CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF HYPERSPECTRAL SATELLITE IMAGING

V. M. Astapenko, V. I. Ivanov, P. P. Khorolsky

Review of current status, the ways of use and prospects of hyperspectral satellite space imaging is presented.