Летные и полевые исследования видеоспектрометра для малого космического аппарата

Б.В. Шилин, В.Н. Груздев

Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН Санкт-Петербург, 197110, Россия, E-mail: bshilin@rambler.ru

Обсуждаются результаты летных и полевых исследований модернизированного образца действующего видеоспектрометра видимого-ближнего инфракрасного диапазона высокого спектрального и пространственного разрешения с полихроматором на дифракционной решетке. Приводится серия монохромных изображений и коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) различных фоноцелевых ситуаций, полученные с самолета и в поле с помощью вращающейся платформы. На изображениях отчетливо прослеживаются изменения яркостных контрастов естественных и искусственных объектов вблизи красного края видимого диапазона. Расчеты КСЯ участков газона, подвергшихся загрязнению хлористым натрием и медным купоросом, показали, что видеоспектральная съемка позволяет выявлять и картографировать площади пораженной растительности на ранних стадиях антропогенного воздействия до появления у растений морфологических изменений. Высокое качество летных и полевых материалов, надежность в работе позволяют рекомендовать видеоспектрометр СПбНУИТМО в качестве основы для создания опытных образцов приборов для малого космического аппарата и полевых работ.

Ключевые слова: видеоспектрометр, видеоспектральная съемка, монохромные изображения, коэффициент спектральной яркости

Одобрена к печати: 07.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-224-232

Введение

В настоящее время одним из основных направлений развития дистанционных аэрокосмических средств оптического диапазона является видеоспектральная (гиперспектральная) съемка, позволяющая регистрировать уходящее излучение объектов земной поверхности с высоким пространственным и спектральным разрешением. За рубежом видеоспектрометры – оптико-электронные приборы с полихроматором и регистрирующей излучение матрицей – активно разрабатываются с начала 80-х гг. прошлого века, и сейчас известно более сорока модификаций, разработанных только для авианосителей (Шилин и др., 2013). В нашей стране активный интерес к этому направлению проявился в последнее десятилетие, о чем свидетельствуют материалы конференции «Гиперспектральные приборы и технологии», проводившейся на базе Красногорского завода им. С.А. Зверева 17-18 января 2013 г. (Контенант, 2013). Однако большинство разрабатываемых в РФ приборов видимого-ближнего ИК диапазона 0,4–1,0 мкм построено по оптической схеме полихроматора с призмой, что дает переменное спектральное разрешение – от 1,5 нм в фиолетовой части спектра до 15 нм в ближнем ИК диапазоне. С точки зрения конечного потребителя этот недостаток является принципиальным и не компенсируется достоинствами призменных приборов – большей светосилой и простотой изготовления. Красный-ближний ИК участок спектра 0,6-1,0 мкм является важнейшим для диагностики и дифференциации растительности по положению и крутизне «красного края» вблизи 700 нм и высоте «ИК-плато» 750–900 нм (van der Meer, de Long, 2006). Ухудшение детальности спектральных кривых и увеличение «спектральной ширины» монохромных изображений в диапазоне 600-900 нм существенно ограничивают

возможности решения прикладных тематических задач дистанционного зондирования, и поэтому представляется предпочтительным использование видеоспектрометров с полихроматорм на дифракционной решетке с равномерно высоким разрешением по спектру.

Аппаратура

Действующий опытный образец такого видеоспектрометра для малого космического аппарата создан в Санкт-Петербургском университете информационных технологий, механики и оптики (главный конструктор К.Н. Чиков). Прибор имеет высокое пространственное разрешение (0,2 мрад) в небольшом поле обзора (6°) и спектральное разрешение не хуже 2,5 нм. С ним проводился ограниченный объем опытных полетов на самолете Ан-30, и были получены только отдельные примеры – монохромные изображения и спектральные кривые удовлетворительного качества (Алексеев и др., 2013). Тогда же для видеоспектрометра были выявлены важные недостатки – низкое быстродействие приемного блока и наличие в нем автоматической регулировки усиления. Первый недостаток позволял получать изображения земной поверхности «без пропусков» на местности только с больших высот (для вертолета это около 2000 м) и для небольших скоростей полета. Второй приводил к существенному искажению контрастов изображений на участках с большими перепадами яркости объектов ландшафта.

В связи с этим в видеоспектрометре было установлено новое приемное устройство с улучшенными характеристиками и проведены летные и полевые исследования.

Обработка данных

Обработка данных проводится в программном продукте ENVI, включающем набор инструментов преобразования и анализа многоспектральных (гиперспектральных) данных. Программа работает с любым количеством спектральных каналов, формируя серии монохромных изображений, а также спектры уходящего излучения участка изображения любой конфигурации (не менее размера проекции пикселя на изображении). Данные формируются в текстовый файл, включающий информацию о минимальных, средних и максимальных значениях спектральных характеристик участка изображения.

При вводе данных в программу ENVI используется конвертор файлов формата RWW, учитывающий спектральную чувствительность матрицы и неравномерность чувствительности матрицы по пикселям.

Программы CAM_VIEW и ENVI позволяют вычислять спектральные характеристики конкретных объектов для различной площади. В летных исследованиях эта площадь может изменяться примерно от одного метра (поле зрения прибора) до нескольких десятков квадратных метров; при полевых работах площадь изменяется соответственно от нескольких квадратных сантиметров (поле зрения прибора) до примерно одного квадратного метра.

Проделанные расчеты для разных площадей на видеоспектральных аэро- и полевых снимках показали заметные различия спектральных кривых, что, по-видимому, связано в первую очередь с неравномерностью проективного покрытия. Однако во всех случаях сохранялась «спектральная аномалия», вызванная загрязнением, что свидетельствует о высокой достоверности видеоспектральных данных и сделанных выводов.

Летные исследования

Новая приемная матрица позволила при аэросъемке с самолета Ан-30 с высоты полета 5000 м получить монохромные изображения «без пропусков». Полеты выполнялись в конце лета в центре европейской части РФ. Это типичный для региона ландшафт с лиственными и смешанными лесами, полями, лугами, небольшими поселками. Результаты аэросъемки представлены на *рис.* 1. Изображения существенно лучше полученных на предыдущих этапах работ и приближаются по качеству к монохромным изображениям аналогичного ландшафта видеоспектрометра «Фрегат» (Марков, Шилин, 2009).



Рис. 1. Серия монохромных изображений

Здесь представлена только часть изображений полного «набора» всего информационного параллелепипеда примерно через 20 нм, но и на них можно проследить характерные изменения контрастов объектов земной поверхности (Чапурский, 1986). Обнажения коренных пород – песчаный карьер в нижней части сцены и участки застройки в центре (чуть выше речки) на коротковолновых монохромных изображениях до подъема «красного края» выглядят светлыми на фоне темной растительности. На длине волны средней части «красного края» (719 нм) происходит выравнивание контрастов этих объектов и далее, в ближних ИК каналах, наблюдается слабая инверсия. Различные виды растительности по сравнению с обнажениями коренных пород в карьерах и другими нарушенными участками (например, поселок) на коротковолновых изображениях до «красного края» выглядят темными и плохо разделяются. Луга и поля выглядят несколько светлее древесной растительности, после инверсии контрастов и подъема ИК-плато луга четко выделяются светлым тоном, несколько более темным и пестрым выглядит лесной покров. В связи с этим интересно отметить, что действующая грунтовая дорога, представляющая обнажения коренных пород (в нижней части изображений у верхней кромки карьера), четко выделяется как светлая линия на фоне темной растительности на всех коротковолновых изображениях. Проходящая выше примерно параллельно заброшенная заросшая кустарником просека отчетливо выделяется светлой линией на монохромных изображениях ближнего ИК диапазона – в зоне ИК плато отражение кустарников выше, чем у лесной растительности.

Водная поверхность небольшой речки в средней части изображения на монохромных изображениях примерно до 680 нм не выделяется или выделяется неуверенно на фоне темной растительности. С красного участка длин волн и далее в ближний ИК-участок водная поверхность четко разделяется с окружающей растительностью благодаря существенно увеличившейся отражательной способности всех видов растительности.

По результатам аэросъемки был выполнен небольшой объем расчетов спектров уходящего излучения некоторых объектов (*puc. 1*). По сравнению с данными, полученными для малых высот полета (Алексеев и др., 2013; Марков, Шилин, 2009), выявились заметные различия для коротковолновой части спектра – наблюдается существенный подъем спектральной кривой от желто-зеленой части спектра к синей и фиолетовой. Это связано с известным явлением сильного атмосферного рассеяния, что отмечается и для материалов видеоспектральной съемки из космоса (Григорьев, Шилин, 2013).

Полевые исследования

При полевых исследованиях видеоспектрометр с ориентированной вертикально входной щелью устанавливается на специальную платформу, созданную на базе киноустановки. Возможность вращения платформы в вертикальной и горизонтальной плоскостях позволяет проводить, аналогично панорамной фотосъемке щелевой камерой или фототеодолитной съемке, панорамную видеоспектральную съемку любой фоноцелевой обстановки, в том числе и на горизонтальной поверхности, при размещении установки на каком-либо возвышении. При этом в пределах панорамы могут быть размещены любые объекты, спектральные характеристики которых представляют фундаментальный или практический интерес, а также различные спектральные эталоны.

Некоторый опыт полевой видеоспектральной съемки конкретных фоноцелевых панорам – куртины деревьев, кусты, газоны, строения, люди – с широкоугольным видеоспектрометром СПбНУИТМО уже имелся (Алексеев, Шилин, 2012). Были получены не только серии (более 120) монохромных изображений в видимом-ближнем ИК диапазоне, но и спектры отраженного излучения и коэффициенты спектральной яркости большого количества объектов.

При полевых работах с узкоугольным видеоспектрометром было принято решение «разнообразить» фоноцелевую ситуацию, создав искусственный стресс травяной растительности загрязнением почвы различными химикатами. Важнейшая экологическая цель – оценка реакции растений на ухудшение условий жизнедеятельности.

Для этого на двух площадях газона до стрижки и после были разбиты два ряда тестовых площадок размером 1м × 1м: соответственно 8 площадок в первом случае и 16 во втором. Загрязнение производилось водными растворами в первом случае медного купороса 23 г, 46 г, 69 г на три литра воды (площадки соответственно 2, 3, 4; 1 –контрольная фоновая) и хлористого натрия 20 г, 40 г, 60 г на три литра воды (площадки соответственно 6, 7, 8; 5 – контрольная фоновая). Для 16 площадок количество реактива было несколько увеличено для второй и третьей загрязненных площадок. Это 20 г, 50 г, 150 г для медного купороса (площадки 2, 3, 4 и 10, 11, 12 – дублирующие, 1 и 9 – контрольные фоновые) и 20 г, 50 г, 150 г для хлористого натрия (площадки 6, 7, 8 и 14, 15, 16 – дублирующие, 5 и 13 – контрольные). В пределах съемочной панорамы были установлены яркостные эталоны для расчета коэффициента спектральной яркости и различные искусственные объекты – защитная сетка, металлические и синтетические покрытия. Углы тестовых площадок маркировались белыми флажками. Загрязнение проводилось 13 мая на 8 площадках и 16 июня на 16 площадках. После внесения загрязнений прошли сильные дожди, что обеспечило надежное просачивание химикатов к корневой системе.

Видеоспектральная съемка проводилась соответственно 15 мая на восьми площадках, 19 июня и 18 июля на шестнадцати площадках.

При обработке данных были получены серии монохромных изображений и спектры отражения и вычислены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) объектов видеоспектральной панорамы.

В качестве примера на *рис. 2a,б,в* приведены два монохромных изображения половины 16-площадочной панорамы и коэффициенты спектральной яркости кустов (боярышник японский декоративный) и гравийной дорожки (в левой части панорамы). На изображениях представлены стриженый газон (нижняя часть изображений), яркостные миры, защитная сетка и кусты у верхнего края изображений, металлический зеленый лист, синтетические покрытия, гравийная дорожка. Так как монохромные изображения выбраны для спектральных каналов до и после подъема «красного края» (*рис. 2a,б*), соответственно для средней длины 587 нм и 737 нм,

то на них хорошо видна известная инверсия спектральных контрастов «растительность – почва или горные породы (гравийная дорожка)» (*puc. 3*): до красного края почва ярче растительности, за красным краем растительность светлее благодаря ее высокой отражательной способности в ближнем ИК диапазоне 750–850 нм. На *puc. 2a* на монохромном изображении канала 587 нм светлыми выглядят гравийная дорожка, бетонная площадка в ее верхней части и синтетическая накидка на кустах (в правой части изображения); темными – соответственно газон и кустарник.



Рис. 2. Монохромные видеоспектральные изображения тестовой панорамы для длин волн 587 нм (а) и 737 нм (б)



Рис. 3. Коэффициенты спектральной яркости кустарника (1) и гравийной дорожки (2)

На монохромном изображении канала 737 нм светлыми выглядят газон и кустарник, темными – дорожка и бетонная площадка. Яркость синтетической накидки близка к яркости растительности.

Расчет коэффициентов спектральной яркости тестовых площадок с различными уровнями загрязнения выявил отчетливые изменения – понижения КСЯ по всему диапазону 450–850 нм (*puc. 4* и 5).



Рис. 4. Коэффициенты спектральной яркости чистой травы (1) и травы, загрязненной различным количеством медного купороса (2,3,4)



Рис. 5. Коэффициенты спектральной яркости чистой травы (1) и травы, загрязненной различным количеством хлористого натрия (6,7,8)

Для медного купороса (*puc. 4*) кривые КСЯ для второй и четвертой площадок практически идентичны; повышение значений КСЯ отмечается для второй площадки.

Для хлористого натрия (*puc. 5*) все три загрязненные площадки имеют четкие различия КСЯ в видимом диапазоне 500–650 нм, причем имеет место обратная зависимость – КСЯ уменьшается с увеличением уровня загрязнения.

Таким образом, на третий день после загрязнения почвы можно уверенно констатировать наличие реакции травяной растительности в виде изменений КСЯ на всех тестовых площадках.

Близкие закономерности получены и для 16 площадок. Основные отличия и некоторый разброс результатов связан с неоднородностью поверхности – на стриженом газоне в поле зрения прибора попадают обнаженные участки почвы. Здесь выявлена важная закономерность – спектральная аномалия сохранились, хотя и в меньших значениях, через месяц (19 июля).

Полученный значительный по объему экспериментальный материал пока не позволяет сделать вывод, что спектральные характеристики растительности помимо уверенного обнаружения химического загрязнения могут дать информацию об уровнях загрязнения - здесь необходимы дополнительные исследования на тестовых участках и определение содержаний элементов-загрязнителей в растениях-индикаторах.

Заключение

Проведенные работы показали:

1. Модернизация видеоспектрометра в части установки нового приемного устройства дала возможность получить монохромные изображения (с самолета и наземной платформы) хорошего качества и детальные спектральные характеристики большого количества объектов в реальном масштабе времени. Это позволяет рекомендовать видеоспектрометр в качестве основы для создания опытных образцов прибора для малого космического аппарата и полевых исследований.

2. Полевая видеоспектральная съемка высокого пространственного и спектрального разрешения является быстрым эффективным методом сбора фундаментальных банков спектральных характеристик объектов земной поверхности и изучения изменений спектральных характеристик под воздействием неблагоприятных факторов антропогенного и естественного происхождения.

Литература

- 1. Алексеев А.А., Груздев В.Н., Шилин Б.В., Красавцев В.М., Чиков К.Н. Летные испытания видеоспектроме-тра с полихроматором на дифракционной решетке // КОНТЕНАНТ. Научно-технический журнал. 2013. Т. 12. № 1. C. 29–35.
- 2. Алексеев А.А., Шилин Б.В. Методика и результаты полевых видеоспектральных исследований // КОНТЕ-НАНТ. Научно-технический журнал. 2013. Т. 12. № 1. С. 36–39.
- Григорьев А.Н., Шилин Б.В. Анализ сезонных изменений спектральных характеристик компонентов ланд-3. шафта по данным космического видеоспектрометра HYPERION // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 6. C. 43-47.
- КОНТЕНАНТ. Научно-технический журнал. 2013. Т.12. № 1. 114 с. 4.
- *Марков А.В., Шилин Б.В.* Проблемы развития видеоспектральной аэросъемки // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 2. С. 20–27.
- Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. М.: Изд. МО 6 CCĆP. 1986. 160 c.
- 7. Шилин Б.В., Груздев В.Н., Алексеев А.А. Видеоспектральные исследования за рубежом // КОНТЕНАНТ. Научно-технический журнал. 2013. Т. 12. № 1. С. 15-20.
- 8. van der Meer F.D., de Long S.M. (Eds.). Imaging spectrometry: Springer. 2006. 403 p.

On-board and field tests of an imaging spectrometer for a small spacecraft

B.V. Shilin, V.N. Gruzdev

Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint-Petersburg 197110, Russia E-mail: bshilin@rambler.ru

The paper presents the results of on-board and field tests of an upgraded model of a visible-near-infrared imaging spectrometer with high spectral and spatial resolution and diffraction grating polychromator. A series of monochrome images and spectral reflectances for different background-target situations were obtained by aerial surveys and ground measurements from a rotating platform. The images clearly traced changes in luminance contrast of natural and artificial objects near the red edge of the visible range. The spectral reflectance of lawn areas, contaminated with sodium chloride and copper sulfate showed that spectral aerial survey can detect and map the affected vegetation areas at early stages of contamination prior to appearance of morphological changes in plants. High quality of the results of the flight and field studies and the reliability of the device allow us to recommend it as a basis for creation of device prototypes for operation onboard small spacecrafts and ground work.

Keywords: imaging spectrometer, hyperspectral photography, monochrome images, spectral reflectance

Accepted: 07.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-224-232

References

- 1. Alekseev A.A., Gruzdev V.N., Shilin B.V., Krasavcev V.M., Chikov K.N., Ljotnye ispytanija videospektrometra s polihromatorom na difrakcionnoj reshjotke (On-board research of the imaging spectrometer based on polychromator with diffraction grating), *KONTENANT. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*, 2013, Vol. 12, No. 1, pp. 29–35.
- 2. Alekseev A.A., Shilin B.V., Metodika i rezul'taty polevyh videospektral'nyh issledovanij (The methodology and the results of field research of the imaging spectrometer), *KONTENANT. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*, 2013, Vol. 12, No. 1, pp. 36–39.
- 3. Grigor'ev A.N., Shilin B.V., Analiz sezonnyh izmenenij spektral'nyh harakteristik komponentov landshafta po dannym kosmicheskogo videospektrometra HYPERION (Analysis of seasonal changes in the spectral characteristics of the components of the landscape according to the space imaging spectrometer HYPERION), *Opticheskij zhurnal*, 2013, Vol. 80, No. 6, pp. 43–47.
- 4. KONTENANT. Nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2013, Vol. 12, No. 1, 114 p.
- 5. Markov A.V., Shilin B.V., Problemy razvitija videospektral'noj ajeros"jomki (Problems in the development of aerial survey using imaging spectrometer), *Opticheskij zhurnal*, 2009, Vol. 76, No. 2, pp. 20–27.
- 6. Chapurskij L.I., *Otrazhatel'nye svojstva prirodnyh ob#ektov v diapazone 400-2500 nm* (The reflective properties of natural objects in the range of 400-2500 nm), Moscow: Izd. MO SSSR, 1986, 160 p.
- Shilin B.V., Gruzdev V.N., Alekseev A.A., Videospektral'nye issledovanija za rubezhom (Foreign research based on using of the imaging spectrometer), *KONTENANT. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*, 2013, Vol. 12, No. 1, pp. 15–20.
- 8. van der Meer F.D., de Long S.M. (Eds.), Imaging spectrometry: Springer, 2006, 403 p.