Возможности дистанционного мониторинга объектов земной поверхности с помощью гиперспектрального комплекса в диапазоне длин волн 400–1700 нм

А. Н. Виноградов¹, Д. С. Демидова¹, В. В. Егоров², А.А. Ильин¹, А. П. Калинин³, А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов⁴, И. П. Родионов⁴

¹ ЗАО «Научно-технический центр «Реагент», Москва, 119991, Россия E-mail: alexey@magn.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: victor_egorov@mail.ru

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН Москва, 119526, Россия E-mail: kalinin@ipmnet.ru

⁴ Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, 119991, Россия E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

Рассматриваются вопросы авиационного гиперспектрального зондирования земной поверхности с использованием двух сенсоров видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Приводятся тактико-технические характеристики бортовых гиперспектральных модулей со спектральными диапазонами 400-1000 и 900-1700 нм, обладающих высоким пространственным и спектральным разрешением. Даётся описание лётного эксперимента, проведённого в Московской области. Гиперспектральная съёмка проводилась с самолёта Ан-2 с высоты 800-900 м в полуденные часы. Методика обработки гиперспектральных кубов базировалась на использовании алгоритмов контролируемой и неконтролируемой классификации. Были получены RGB-изображения участков местности, занятых лесом, сельскохозяйственным посевом, травой, приусадебными участками и дорогами. Из исходных гиперспектральных кубов рассчитывались соответствующие изображения первых главных компонент. Статистическая обработка этих изображений сводилась к расчёту гистограмм с последующей их аппроксимацией набором гауссовых кривых методом разделения смесей. По полученным аппроксимациям производилось вычисление таблиц точности, относящихся как к раздельному, так и совместному использованию данных обоих гиперспектральных модулей. Показано, что вероятности правильной классификации объектов сцены при раздельной обработке в среднем составляли около 0,85 (исключая приусадебные участки и дороги), а при совместной обработке — 0,98.

Ключевые слова: гиперспектрометр, видимый и ближний инфракрасный диапазон, природный объект, главные компоненты, классификация, кластер, ложная тревога, матрица точности

> Одобрена к печати: 21.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-21-28

Введение

Дистанционный мониторинг земной поверхности, осуществляемый с помощью гиперспектральных сенсоров, в последние годы становится всё более актуальным. Это обусловлено двумя факторами: созданием новых образцов гиперспектрометров с повышенным пространственным и спектральным разрешением (Виноградов и др., 2017а, б; Rodionov et al., 2014) и их высокой информативностью, поскольку именно в спектре восходящего от объекта зондирования сигнала заключена вся полезная информация (Исимару, 1980). Вместе с тем исследование потенциальных возможностей использования бортовых гиперспектрометров в решении задач дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических платформ остаётся весьма злободневным. И здесь авиационные эксперименты служат для отработки методик космической съёмки. Важно выяснить: каковы реальные количественные характеристики, касающиеся определения точности классификации и оценки состояния зондируемых объектов по данным гиперспектрального зондирования. В качестве первого шага к решению этих вопросов целесообразно изучить возможности классификации (контролируемой и неконтролируемой) заданного вида объектов земной поверхности по данным авиационной гиперспектральной съёмки в диапазоне 400–1700 нм. В настоящем исследовании этот диапазон был разбит на два поддиапазона: 400–1000 и 900–1700 нм, — и каждый из них был реализован в отдельном приборе комплекса. Такое разбиение сделано исходя из конструктивных соображений, позволивших получить максимальные значения разрешающей способности сенсоров как пространственному, так и спектральному разрешению (Vinogradov et al., 2016).

Целью статьи является демонстрация возможностей гиперспектральной съёмки в диапазоне 400—1700 нм с использованием комплекса двух гиперспектрометров — видимого и ближнего инфракрасного диапазона — на основе результатов лётного эксперимента.

Технические характеристики гиперспектрометров и условия проведения лётного эксперимента

Целью лётного эксперимента была оценка возможностей повышения информативности (вероятности распознавания) при использовании расширенного спектрального диапазона при гиперспектральных исследованиях.

Съёмка выбранных участков земной поверхности проводилась с самолёта Ан-2 в июле в полуденные часы.

Гиперспектрометры устанавливались на гиростабилизированной платформе Somag SSM 350, и их оптические оси были съюстированы. Кроме того, на гироплатформе были размещены цветная видеокамера Full HD и GPS-приёмник. Технические характеристики гиперспектрометров ВИД-ИКЗ и БИК1 приведены в *табл. 1*.

Параметр	Гиперспектрометр	
	ВИД-ИКЗ	БИК1
Спектральный диапазон, нм	400-1000	900-1700
Угол поля зрения, град	35	35
Ширина спектральных каналов в пределах указанного спектрального диапазона, нм	от 0,3 до 10	3,2
Число спектральных каналов	980	250
Число пикселов по пространственной координате	2048	320
Угловое разрешение, рад	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Масса, кг	8	8

Таблица 1. Характеристики гиперспектрометров ВИД-ИКЗ (Виноградов и др., 2017а) и БИК1 (Виноградов и др., 2017б)

Данные лётного эксперимента, их обработка и обсуждение результатов

Целью проводимых лётных испытаний на самолёте AH-2 стала проверка работоспособности гиперспектрометров ВИД-ИКЗ и БИК1 и оценка их основных технических характеристик. Съёмка проводилась 5 июля 2016 г. с 12:00 до 14:00 по московскому времени, что соответствовало высоте Солнца 56–53°. Скорость полёта самолёта составляла 120 км/ч, а высота съёмки — 800–900 м. Результаты съёмки регистрировались на борту самолёта в блоке управления и предварительной обработки. В нём наряду с данными гиперспектрометров записывались материалы синхронной черно-белой видеосъёмки и данные GPS-приёмника.

На этапе предварительной обработки гиперкубов, полученных обоими гиперспектрометрами, проводился пересчёт значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ), причём в качестве эталона использовалось белое прорезиненное полотно размером 3×3 м. Съёмка эталона проводилась в начале и в конце полёта. Переход от СПЭЯ к КСЯ позволил в значительной степени избавиться от мешающего воздействия атмосферы.

Материалы гиперспектральной съёмки

На *рис.* 1 показаны RGB-изображения (в условных цветах) одного и того же участка трассовой съёмки, полученные гиперспектрометрами ВИД-ИКЗ и БИК1. Цифрами на рисунках показаны объекты сцены, которые соответствуют: 1 — участку, занятому лесом; 2 — сельскохозяйственному посеву; 3 — участкам, занятым травой; 4 — приусадебным участкам и грунтовым дорогам.

Сравнение гиперспектральных изображений с изображением, полученным с помощью кадровой видеосъёмки, позволило сделать вывод о том, что первые практически не отличаются от видеокадра по своим геометрическим характеристикам. Таким образом, оба гиперспектрометра обладают достаточно высокой геометрической верностью. На снимках различаются детали размером в единицы метров (БИК1) и менее (ВИД-ИК3).



Рис. 1. RGB-изображения (в условных цветах) одного и того же участка трассы, полученные гиперспектрометрами: *а* – ВИД-ИКЗ; *б* – БИК1

Как видно на обоих рисунках, местность, подвергнутая съёмке, занята в основном тем или иным видом растительности, и поэтому различать её по категориям с помощью формальных алгоритмов будет достаточно сложно.

Методика обработки гиперспектральных данных

Методика обработки гиперспектральных данных сенсоров ВИД-ИКЗ и БИК1 сводилась к следующему:

- 1. Осуществлялось формирование изображений первых главных компонент по данным гиперкубов обоих сенсоров (*puc. 2*).
- 2. Вычислялись гистограммы яркостей обеих первых главных компонент (*puc. 3*, чёрные кривые).
- 3. Выполнялась процедура представления гистограмм первых главных компонент в виде набора гауссовых кривых (процедура «разделения смеси») (VanderPlas, 2016) (*puc. 3*, зелёные, синие, голубые, сиреневые кривые, см. с. 13).
- 4. Вычислялись матрицы точности классификации объектов 1–4 (см. *рис. 1*) по гистограммам первых главных компонент (вероятности ошибок первого и второго рода и вероятности правильной классификации) с использованием критерия «идеального наблюдателя».



Рис. 2. Изображения снятой территории с помощью первых главных компонент: *а* — по данным ВИД-ИКЗ; *б* — по данным БИК



Рис. 3. Гистограммы изображений первых главных компонент: *а* — по данным ВИД-ИКЗ; *б* — по данным БИК1

Результаты обработки и их обсуждение

Переход от гиперспектральных изображений к изображениям первых главных компонент был вызван следующими соображениями: во-первых, значения спектральных яркостей во многих каналах сильно коррелированы и потому не вносят дополнительного информационного вклада; во-вторых, дисперсии яркостей первых главных компонент составляют, как правило, более 70 % дисперсий исходных гиперспектральных изображений, т.е. первые главные компоненты содержат в себе большую часть информации, содержащейся в гиперкубах. Это обеспечивает получение максимального контраста изображений первых главных компонент. Обратимся к рассмотрению изображений, представленных на *рис. 2.*

Визуальный анализ обоих изображений показывает, что они являются слабо контрастными, особенно это относится к первой главной компоненте для изображения ВИД-ИКЗ. Очевидно, это связано с тем, что большая часть сцены занята растительностью (лес, посев, трава). Это подтверждается структурой гистограмм первых главных компонент (*puc. 3*), полученных на основании *puc. 2*.

Нетрудно заметить, что формы гистограмм для гиперспектральных изображений существенно различаются. Гистограмма первой главной компоненты по данным БИК1 (см. *puc. 36*) оказалась значительно шире, чем для аналогичной компоненты ВИД-ИК3 (см. *puc. 3a*). Это говорит о том, что данные гиперспектрометра БИК1 более информативны, чем данные ВИД-ИК3. Однако, поскольку контрасты объектов 1–4 (см. *puc. 1 и 2*) невелики (хуже на изображении ВИД-ИК3), обе гистограммы практически не разделяются на парциальные составляющие, особенно гистограмма первой главной компоненты, полученной по данным ВИД-ИК3 (см. *puc. 3a*, чёрная кривая).

Несмотря на то что в формирование первых главных компонент вносят свой вклад все спектральные каналы гиперспектрометров, их относительные веса могут сильно отличаться. Были проанализированы значения дисперсий на главной диагонали ковариационной матрицы данных гиперспектрального куба. В результате выявилось, что заметный вклад в первые главные компоненты вносят участки спектров с центрами длины волны: 478, 544, 670, 773, 860, 934, 961, 1019, 1241, 1560 нм. Очевидно, что, поскольку большая часть территории кадра занята растительностью, основной весовой вклад вносят гиперспектральные каналы, выделенные жирным шрифтом.

Следует отметить, что обе гистограммы достаточно хорошо аппроксимируются набором из четырёх гауссиан. Здесь зелёным цветом выделена парциальная гистограмма, соответствующая лесу (1 на *puc. 1* и 2), синим — сельскохозяйственному посеву (2 на *puc. 1* и 2), голубым — траве (3 на *puc. 1* и 2) и сиреневым — приусадебным участкам и грунтовым дорогам

(4 на *рис. 1 и 2*). Удовлетворительная аппроксимация парциальных гистограмм гауссианами, во-первых, говорит о сравнительной однородности классифицируемых объектов, а во-вторых, позволяет утверждать, что основных типов объектов действительно четыре. Такое разделение обеих гистограмм на сумму гауссиан («разделение смеси») (VanderPlas, 2016) позволяет вычислить матрицы точностей (*maбл. 2 и 3*) для соответствующих гистограмм по критерию «идеального наблюдателя», включающие в себя вероятности ошибок первого рода, находящиеся ниже диагонали матриц, и ошибок второго рода — выше диагонали. По диагоналям матриц располагаются значения вероятностей правильной классификации. Как и следовало ожидать, величины вероятностей ошибок первого и второго рода для некоторых объектов (например, для трав, приусадебных участков и дорог) достаточно велики, а соответственно, вероятности правильной классификации объекта «приусадебные участки и дороги» может даже считаться неудовлетворительной — порядка 0,5. Остальные объекты классифицируются отдельными гиперспектральными модулями с вероятностью 0,85 (в среднем).

Объект	Объект			
	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,89800	0,1010	~0	~0
Посев	0,04370	0,8100	0,0089	~0
Трава	0,00151	0,1140	0,8400	0,0458
Приусадебные участки и дороги	0,00206	0,0215	0,4790	0,4920

Таблица 2. Матрица точности по данным гиперспектрометра ВИД-ИКЗ

Таблица 3. Матрица точности по данным гиперспектрометра БИК1

Объект	Объект			
	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,87300	0,1260	1,586 e-04	~0
Посев	0,03590	0,8590	0,104	~0
Трава	0,00134	0,0890	0,848	0,0619
Приусадебные участки и дороги	0,00363	0,0217	0,457	0,5210

Таблица 4. Матрица точности по данным гиперспектрометров ВИД-ИКЗ и БИК1

Объект	Объект			
	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,9870	0,013	~0	~0
Посев	0,0016	0,973	0,001	~0
Трава	2e-05	0,010	0,976	0,003
Приусадебные участки и дороги	7e-05	5e-04	0,218	0,757

Если предположить, что флуктуации спектральных яркостей в гиперспектрометрах ВИД-ИКЗ и БИК1 независимы, то для вычисления вероятности правильной классификации объектов зондирования p_{Σ} при совместном использовании гиперспектральных данных обоих сенсоров следует использовать соотношение $p_{\Sigma} = p_1 + p_2 - p_1 p_2$. Здесь p_1 и p_2 — диагональные члены в *табл. 2* и *3* соответственно; p_{Σ} — диагональные члены *табл. 4*. При этом

значения p_{Σ} для объектов «лес», «посев», «трава» будут порядка 0,98. Это является хорошим результатом, учитывая, что характер анализируемой сцены, касающийся типов объектов, был достаточно однородным (растительность). Однако для такого объекта, как «приусадебные участки и дороги», вероятность его правильной классификации остаётся невысокой — 0,757, а вероятность перепутывания с объектом «трава» весьма неудовлетворительной — 0,218. Действительно, на приусадебных участках могут располагаться травяные газоны и огороды, что и приводит к таким результатам.

Заключение

Разработка новых образцов авиационных гиперспектрометров видимого и ближнего инфракрасного диапазона — актуальное научно-техническое направление отечественного приборостроения. Использование гиперспектрометров (imaging spectrometers) вместо многозональных сканеров позволяет улучшить вероятностные характеристики распознавания и оценки состояния зондируемых объектов, поскольку полезная информация заключена во всей огибающей спектра принимаемого сигнала, а не в отдельных её спектральных выборках.

Одним из важных этапов создания бортовых гиперспектральных сенсоров является этап проведения лётных испытаний для определения работоспособности, оценки технических характеристик и возможностей сенсоров в части дистанционного распознавания типа и состояния зондируемых природных и антропогенных объектов. Выполненные исследования, в том числе и лётные эксперименты, позволили сделать вывод о том, что оба гиперспектрометра комплекса действительно обладают заложенными при их проектировании характеристиками относительно пространственного разрешения и геометрической верности получаемых изображений.

Результаты правильной классификации объектов зондируемой сцены даже в случае использования данных гиперспектрометров по отдельности оказались вполне удовлетворительными, исключая объект «приусадебные участки» (в среднем равные вероятности 0,85), несмотря на то что большинство объектов принадлежали одной категории (растительность). Совместное использование приборов комплекса позволяет повысить эту вероятность в среднем до 0,98. В то же время для такого объекта, как «приусадебные участки и дороги», вероятность его правильной классификации остаётся невысокой — 0,757, а вероятность перепутывания с объектом «трава» является неудовлетворительной — 0,218.

Таким образом, выполненные исследования свидетельствует о целесообразности использования комплекса гиперспектрометров на диапазон 400–1700 нм для мониторинга объектов земной поверхности.

Литература

- 1. Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д., Родионова И. П. (2017а) Разработка и исследование гиперспектрометра ближнего инфракрасного диапазона БИК1: Препринт ИКИ РАН. Пр-2182. 2017. 22 с.
- 2. Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д., Родионова И. П. (20176) Авиационная система дистанционного мониторинга Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (400–1700 нм) // Датчики и системы. 2017. № 5. С. 32–36.
- 3. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир, 1980. 280 с.
- Rodionov I. D., Rodionov A. I., Vedeshin L. A., Egorov V. V., Kalinin A. P. Airborne hyperspectral systems for solving remote sensing problems // Izvestija. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. V. 50. No. 9. P. 983–1003.
- 5. VanderPlas J. Python Data Science Handbook. O'Reilly Media, 2016. 541 p.
- 6. *Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D.* A line of aviation hyperspectrometers in the UV, visible, and near-IR ranges // J. Optical Technology. 2016. V. 83. Iss. 4. P. 237–243.

Capabilities of remote monitoring of Earth surface objects with a hyperspectral complex in the band of 400–1700 nm

A. N. Vinogradov¹, D. S. Demidova¹, V. V. Egorov², A. A. Illin¹, A. P. Kalinin³, A. I. Rodionov¹, I. D. Rodionov⁴, I. P. Rodionova⁴

¹ "Reagent" Research and Development Center, Moscow 119991, Russia E-mail: alexey@magn.ru

² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: victor_egorov@mail.ru

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow 119526, Russia E-mail: kalinin@ipmnet.ru

⁴ Semyonov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow 119991, Russia E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

The problems of aviation hyperspectral remote sensing of the Earth surface using visible and near infrared sensors have been considered. Technical characteristics of onboard hyperspectral modules of 400–1000 and 900–1700 nm bands of a high spatial and spectral resolution are provided. The aviation test carried out in the Moscow region in Summer 2016 from board of the An-2 plane (800–900 m flight height) in the afternoon is described. The methodology for processing the obtained hyperspectral cubes is based on algorithms of both controlled and non-controlled classification. RGB-images of terrains covered by forest, agricultural plants and grass and those occupied by private plots and roads have been received. Calculated images of the principle components were based on initial hyperspectral cubes received from both modules. Statistical processing of the images is limited to calculation of histograms followed by an approximation by Gaussian curves using the technique of mixture separation. The obtained approximations are used for calculation of the accuracy tables relating both to separate and aggregate usage of the two hyperspectral modules' data. As a result, probability value for a correct classification of the scene objects using separate modules processing is estimated at 0.85 in average (excluding private plots and roads) and under aggregate processing at 0.98.

Keywords: hyperspectrometer, visual and near infrared band, natural object, principal components, classification, cluster, false alarm, matrix of accuracy

Accepted: 21.12.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-21-28

References

- Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D., Rodionova I. P., *Razrabotka i issledovanie giperspektrometra blizhnego infrakrasnogo diapazona BIK1. Preprint IKI RAN Pr-2182* (Design and examination of the near infrared band hyperspectrometer BIK1. Preprint IKI RAN Pr-2182), IKI RAN, 2017, 22 p.
- Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D., Rodionova I. P., Aviacionnaya sistema distantsionnogo monitoringa Zemli v vidimom i blizhnem infrakrasnom diapazone (400– 1700 nm) (Earth remote sensing aviation system in VNIR band (400–1700 nm)), *Datchiki i sistemy*, 2017, No. 5. pp. 32–36.
- 3. Isimaru A., *Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchaino neodnorodnykh sredakh* (Propagation and scattering waves in random heterogeneous media), Moscow: Izd. Mir, 1980, Vol. 1, 280 p.
- 4. Rodionov I. D., Rodionov A. I., Vedeshin L. A., Egorov V. V., Kalinin A. P., Airborne hyperspectral systems for solving remote sensing problems, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, Vol. 50, No. 9, pp. 983–1003.
- 5. VanderPlas J., Python Data Science Handbook, O'Reilly Media, 2016, 541 p.
- Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D., A line of aviation hyperspectrometers in the UV, visible, and near-IR ranges, *J. Optical Technology*, 2016, Vol. 83, Issue 4, pp. 237–243.