

Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением

А.Н. Виноградов ¹, В.В. Егоров ², А.П. Калинин ³, А.И. Родионов ⁴, И.Д. Родионов ⁵

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва Ленинские горы, e-mail: alexey@magn.ru*

² *Институт космических исследований РАН Москва, 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, e-mail: victor_egorov@mail.ru*

³ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 19526, Москва проспект Вернадского 101, корп. 1, e-mail: kalinin@ipmnet.ru*

⁴ *ЗАО НТЦ «Реагент», 119991, Москва, Косыгина, 4, e-mail: arodionov@reagent-rdc.ru*

⁵ *Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, 119991, Москва, Косыгина, 4, e-mail: irodionov@reagent-rdc.ru*

Приводится описание бортового гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов высокого пространственного разрешения, созданного в НТЦ «Реагент». Прибор обладает следующими основными характеристиками: угловым полем зрения 15°, мгновенным угловым полем зрения 1 мрад, числом спектральных каналов не менее 250 и отношением сигнал/шум более 100. Режим гиперспектральной съемки сопровождается синхронной видеосъемкой, что позволяет осуществлять географическую привязку гиперспектральных данных и проводить учет искажений гиперспектральных изображений, связанных с угловыми эволюциями носителя. Проведенные лабораторные и натурные испытания подтвердили основные проектные характеристики.

Ключевые слова: гиперспектрометр, видеокамера, спектральное и пространственное разрешение, классификация, искажения, видимый и ближний инфракрасный диапазон, лабораторные и натурные испытания.

Введение

В настоящее время бортовые гиперспектрометры приобретают все более важную роль в дистанционном зондировании Земли, обеспечивают получение максимального количества информации о типе и состоянии объектов исследуемой поверхности (Воронцов и др., 2002; Непобедимый и др., 2004; Егоров и др., 2007). Известно, что гиперспектрометр является прибором, который позволяет осуществлять дистанционную регистрацию отраженных, рассеянных и излученных электромагнитных волн. Идентификация и определение параметров состояния природных и антропогенных объектов при гиперспектральных измерениях базируется на специфических особенностях их спектров, регистрируемых прибором. Указанные особенности определяются различными свойствами зондируемых объектов и условиями наблюдений: химическим составом, макро- и микрорельефом, состоянием атмосферы, высотой Солнца и т. д.

За последние два десятилетия за рубежом создано несколько десятков гиперспектрометров авиационного и космического базирования. Сведения о реально созданных отечественных гиперспектрометрах крайне скудны. С сожалением, можно констатировать некоторое отставание развития гиперспектральных технологий в России от мирового уровня в части спектрального и пространственного разрешения. В НТЦ «Реагент» созданы различные типы гиперспектрометров (Калинин и др., 2006), позволяющих работать как в лабораторных условиях, так и с авиационных носителей.

Целью настоящей работы является описание бортового гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением и результатов его лабораторных и натурных испытаний.

Описание гиперспектрометра

Гиперспектрометр построен по схеме “pushbroom”, т. е. в один момент времени регистрируется разложенное в спектр изображение узкой полосы земной поверхности перпендикулярно треку летательного аппарата (рис. 1).

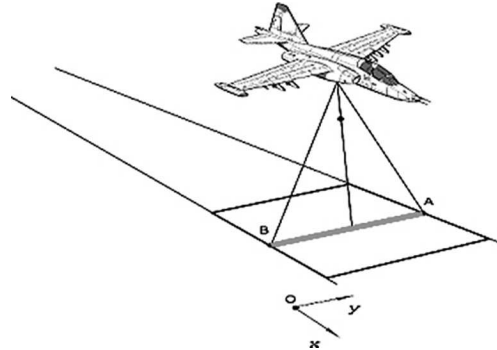


Рис. 1. Дистанционное зондирование Земли авиационным гиперспектрометром типа Pushbroom

Оптическая схема прибора показана на рис. 2. В качестве разлагающего в спектр элемента (спектроредителя) используется стеклянная призма. Регистрация изображения производится на активно-пиксельную кремневую матрицу.

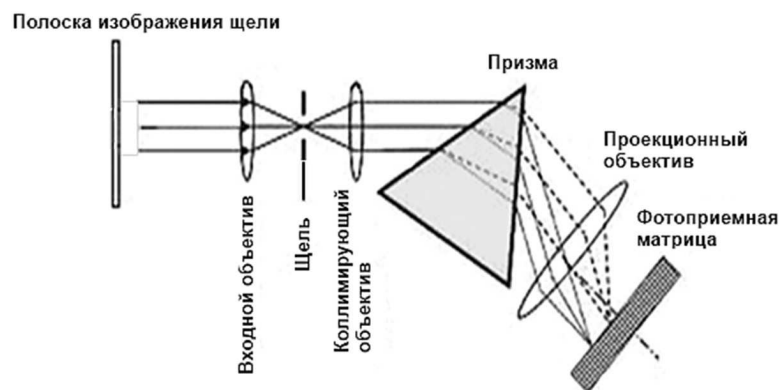


Рис. 2. Оптическая схема гиперспектрометра

В результате проведения гиперспектральной съемки объекта дистанционного зондирования формируется так называемый «гиперкуб» (рис. 3). В плоскости ХОУ формируется пространственное изображение зондируемого объекта, для каждого пикселя которого существует развертка по длине волны λ (цветовая информация). Кроме трех указанных координат, также к ним может добавляться еще поляризационная координата. Таким образом, измеряемые гиперспектрометром данные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве.

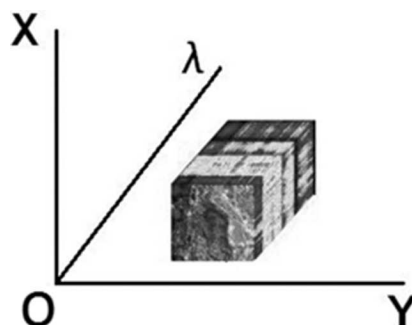


Рис. 3. Гиперкуб

Созданный в НТЦ «Реагент» гиперспектрометр с высоким пространственным разрешением показан на рис. 4: внешний (а) и внутренний (б) вид; 1 — собственно гиперспектрометр, 2 — цифровая видеокамера, которая служит как для привязки гиперспектральных данных к местности, а также для устранения искажений, связанных с динамикой движения носителя гиперспектрометра.

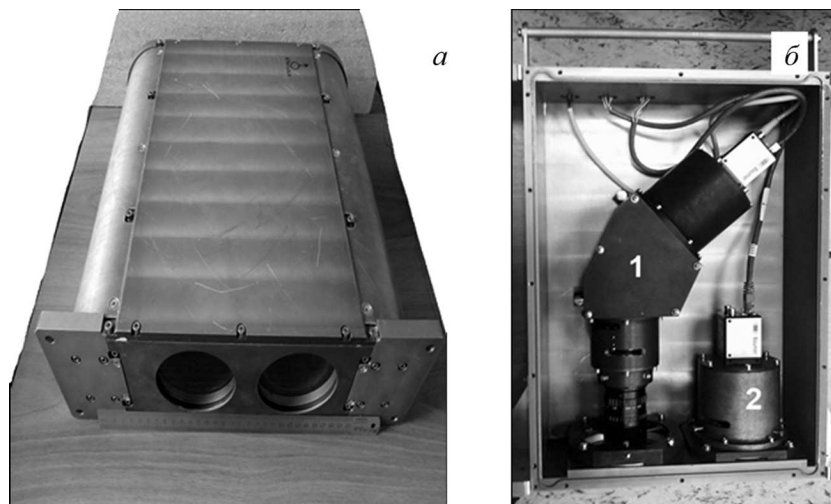


Рис. 4. Бортовой гиперспектрометр: а — внешний вид прибора; б — внутреннее устройство

Ниже приведены характеристики гиперспектрометра.

Поле зрения гиперспектрометра	15°
Поле зрения видеоканала	30°
Спектральный диапазон	450...800 нм
Количество спектральных каналов	не менее 250
Светосила, D/f	0,95
Пространственное разрешение	не хуже 1 мрад
Отношение сигнал/шум	не менее 100
Максимальная скорость записи данных	30 fps
Разрешение фоточувствительного элемента	1390×1040
Размер фоточувствительного элемента	8,8×6,6 мм (2/3")
Сетевой интерфейс	1 GbEthernet
Питание, В	8...30 В
Потребляемый ток	240...1240 мА
Потребляемая мощность	7...12 Вт

Лабораторные и натурные измерения

Для демонстрации возможностей созданного гиперспектрометра были проведены лабораторные и натурные эксперименты. Так как созданный гиперспектрометр построен по схеме «push broom», то он вырезает узкую полоску на исследуемом объекте и для того, чтобы получить изображение всего объекта в лабораторных условиях необходимо либо перемещать перед объективом гиперспектрометра с небольшой постоянной скоростью объект или перемещать гиперспектрометр. Более приемлемым вариантом получения гиперспектрального изображения объекта неподвижным гиперспектрометром является перемещение изображения объекта с помощью вращающегося зеркала, размещенного перед объективом гиперспектрометра. На рис. 5 показано такое гиперспектральное изображение городского пейзажа в RGB цветах.

Качественный анализ рис. 5 показывает, что гиперспектрометр действительно обладает высоким пространственным разрешением. Выделяются отдельные листья на деревьях, разрешается удаленная рекламная надпись на доме и другие мелкие объекты.



Рис. 5. Гиперспектральное RGB-изображение городского пейзажа

Следующим шагом исследования работоспособности прибора было проведение натуральных экспериментов с борта самолета. Гиперспектральные измерения проводились в ясную солнечную погоду в отсутствии облачности в период с 10 до 12 ч местного времени с высоты 1000 м при скорости полета самолета 140 км/ч.

На рис. 6 приведено гиперспектральное изображение в RGB цветах небольшого поселка с прилегающими участками пашни, оставленной под пар (а), травянистых лугов (б), крышами домов (в) и асфальтированными дорогами (г), для которых на рис. 7 приведены соответствующие графики спектральной плотности энергетической яркости. (СПЭЯ). Они наглядно демонстрируют спектральные отличия различных исследованных объектов.



Рис. 6. Гиперспектральное RGB-изображение поселка и его окрестностей, полученное с борта самолета

Из анализа рис. 7а следует, что СПЭЯ убывает до длины волны 700 нм. В диапазоне 530...560 нм имеется небольшой подъем, связанный с некоторым зарастанием пара растительностью и обусловленный повышенной отражательной способностью хлорофилла. В ближней ИК-зоне график СПЭЯ сильно изрезан, что обусловлено поглощением солнечного

излучения молекулами кислорода и парами воды. Аналогичная изрезанность СПЭЯ наблюдается и на других графиках рис. 7. Классический образец спектра зеленой растительности с ярко выраженным пиком в области 530...560 нм, сильным поглощением излучения солнца в красной области спектра в диапазоне 650...690 нм и резким подъемом значений СПЭЯ в ближней инфракрасной области представлен на рис. 7б.

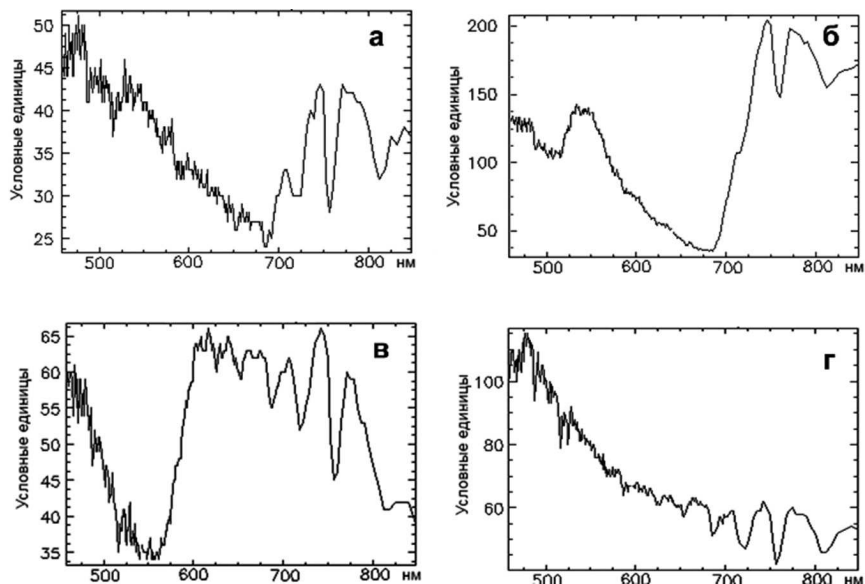


Рис. 7. Коэффициенты спектральной яркости в точках (а), (б), (в) и (г) рис. 6

Среди антропогенных объектов можно выделить здание с красной металло-черепичной крышей (рис. 7в) и полотно асфальтовой дороги (рис. 7г). Красная крыша, как и следовало ожидать, характеризуется резким подъемом СПЭЯ в области 580...620 нм. Спектр отражения от асфальта характеризуется квазиэкспоненциальным спаданием. Он значительно отличается от других спектров отсутствием выраженных особенностей (спадов или пиков).

Для демонстрации высокой пространственной разрешающей способности созданного гиперспектрометра была выполнена съемка просеки в лесном массиве с линией электропередачи (ЛЭП), результаты которой в RGB-цветах показаны на рис. 8. Именно высокое пространственное разрешение прибора позволило выделить на снимке провода ЛЭП, опоры и тени от них.

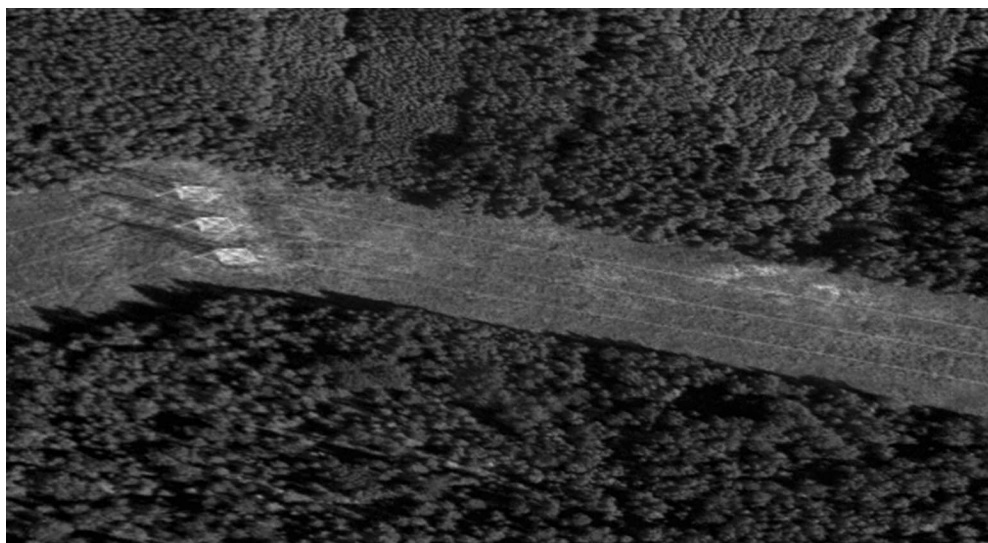


Рис. 8. Гиперспектральное RGB-изображение просеки в лесу с линией электропередачи, полученное с борта самолета

Выводы

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- создан отечественный бортовой авиационный гиперспектрометр с диспергирующим элементом в виде призмы, обладающий высоким пространственным разрешением, мгновенное угловое поле зрения которого 1 мрад;
- высокое пространственное разрешение и наличие большого числа спектральных каналов (не менее 250) позволяет эффективно использовать созданный гиперспектрометр для решения таких задач как разделение зондируемых объектов по категориям, а также определение их состояния;
- лабораторные и натурные испытания подтвердили характеристики, закладываемые при проектировании и создании гиперспектрометра, и продемонстрировали высокое качество получаемых с его помощью изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.523.11.3005).

Литература

1. *Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф.* Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли: Препринт. М.: ИПМ РАН, 2002. № 702. 35 с.
2. *Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д.* Оценка количественных биометрических характеристик посевов наркосодержащих культур по данным авиационного гиперспектрального // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 64–69.
3. *Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионова И.П., Орлов А.Г.* Гиперспектрометр — как элемент системы интеллектуального технического зрения // Датчики и системы. 2007. № 8. С. 33–35.
4. *Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д.* Авиационный гиперспектрометр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. № 3. С. 11–24 (Сер. «Приборостроение»).
5. *Непобедимый С.П., Родионов И.Д., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калашников С.К., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Родионов А.И., Шилов И.Б., Любимов В.Н., Осипов А.Ф.* Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли // Доклады Академии наук. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.
6. *Rouse J.W.* Monitoring the Vernal advancement and Retrogradation of natural vegetation // NASA/GSFCT Type II report, Greenbelt, MD, USA, 1973.

On board visual and near UV-band hyperspectrometr with high spatial resolution

A.N. Vinogradov ¹, V.V. Egorov ², A.P. Kalinin ³, A.I. Rodionov ⁴, I.D. Rodionov ⁵

¹ *M.V. Lomonosov Moscow state university,
119991, Moscow, Leninskie Gory, e-mail: alexey@magn.ru*

² *Space Research Institute,
117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32, e-mail: victor_egorov@mail.ru*

³ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences,
119526, Moscow, Vernadskogo Pr., 100-1, e-mail: kalinin@ipmnet.ru*

⁴ *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre,
119991, Moscow, Kosygin, 4, e-mail: arodionov@reagent-rdc.ru*

⁵ *Semyonov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Kosygin, 4, e-mail: irodionov@reagent-rdc.ru*

The description of onboard visual and near UV- band hyperspectrometer with high spatial resolution that developed and produced by Stock Company Reagent Scientific Engineering Centre is given. This device has next main characteristics: FOV – 15°, IFOV – 1 mrad, spectral channel number more than 250, signal/noise ratio more than 100. Hyperspectral mode of this device is accompanied by synchronous video survey that permits to perform geographical positioning and correction of hyperspectral images due to angle vehicle evolution. The laboratory and natural experiments confirmed the main project characteristics of hyperspectrometr.

Keywords: hyperspectrometr, video camera, spectral and spatial resolution, classification, distortion, visual and near UV-band, actual test experiments.