

УДК 28.835.042.3

Гиперспектрометр ближнего инфракрасного диапазона 900–1700 нм

© 2017 г. **А. Н. Виноградов***, канд. физ.-мат. наук;
В. В. Егоров**, канд. техн. наук; **А. П. Калинин***,******, доктор физ.-мат. наук,
А. И. Родионов*, канд. физ.-мат. наук; **И. Д. Родионов******, доктор физ.-мат. наук

*Закрытое акционерное общество «Научно-производственный центр «Реагент», Москва

**Институт космических исследований РАН, Москва

***Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

**** Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

E-mail: victor_egorov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2017

Приводится описание гиперспектрометра ближнего инфракрасного диапазона (900–1700 нм), предназначенного для решения различных научных и прикладных задач, касающихся проблем экологии, дистанционного зондирования Земли, мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, лесных массивов и т.п., способного работать как с авианосителей, так и в лабораторных и наземных условиях. Лабораторные и лётные испытания гиперспектрометра подтвердили правильность основных технических решений, позволили оценить его работоспособность и технические характеристики.

Ключевые слова: гиперспектрометр, ближний инфракрасный диапазон, изображение, спектр, мониторинг, состояние, разрешение, экология.

Коды OCIS: 280.0280, 110.4234.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом все больший интерес проявляется к использованию гиперспектрометров ближнего ИК диапазона как для решения фундаментальных и практических задач дистанционного зондирования земной поверхности с борта космических и авиационных носителей, так и для лабораторных и наземных исследований, например, процессов горения и взрыва, медицинских приложений и т.п. Этот интерес объясняется тем, что гиперспектральные данные об исследуемых объектах и явлениях содержат в себе максимальное количество полезной информации, содержащейся в поступающем в сенсор излучении [1].

Корректное и эффективное решение указанных выше задач накладывает жёсткие условия на конструкцию и технические характеристики гиперспектрометра.

В России и за рубежом разработка бортовых гиперспектрометров получила развитие с начала 80-х годов прошлого столетия [2]. Следует также упомянуть разработки гиперспектральных сенсоров, выполненных в ряде отечественных организа-

ций [3, 4]. В настоящее время одним из отечественных разработчиков таких сенсоров (ЗАО «НПП «Реагент» [5]) была создана линейка современных гиперспектрометров, по своим основным параметрам не уступающих лучшим зарубежным образцам [6]. В то же время в отечественных разработках, в отличие от зарубежных, уделяется мало внимания сенсорам ближнего инфракрасного диапазона.

Целью настоящей статьи является описание конструкции, принципов работы гиперспектрометра ближнего ИК диапазона 900–1700 нм (БИК1), созданного ЗАО «НПП «Реагент», который может использоваться как для авиационных исследований, так и в наземных и лабораторных условиях.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Ближний инфракрасный диапазон (SWIR) охватывает длины волн от 800 нм до 2500 нм. В табл. 1 приведены основные технические характеристики некоторых зарубежных гиперспектрометров ближнего ИК диапазона.

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых зарубежных гиперспектрометров ближнего инфракрасного диапазона

Название	Производитель	Диапазон, мкм	Ширина каналов средняя, нм	Число каналов	Угловое разрешение, рад	Поле зрения поперек трека, град
AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab (США),	0,4–2,45	9,7	224	1×10^{-3}	30
HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)	Naval Research Lab (США),	0,4–2,5	13,4	210	$0,5 \times 10^{-3}$	9
Pika NIR	Resonon (США)	0,9–1,7	4,9	164	$(0,4–6,3) \times 10^{-3}$	7,3–90
SWIR-640	NovaSol (США)	0,85–1,7	8,33	102	$0,4 \times 10^{-3}$	15
HyMap	Integrated Spectronics (Австралия),	0,45–2,5	14,3	126	2×10^{-3}	60
SPECIM FX17	Specim Spectral Imaging (Финляндия))	0,9–1,7	8	224	1×10^{-3}	38
AisaFenix1K-SWIR	Specim Spectral Imaging (Финляндия))	0,97–2,5	14	256	$0,68 \times 10^{-3}$	40
SASI-1500A	ITREX (Canada)	0,95–2,45	15	100	$0,7 \times 10^{-3}$	40
SWIR-384	HySpecx (Норвегия)	0,93–2,5	5,45	384	$0,73 \times 10^{-3}$	16
ODIN-1024 (SWIR)	HySpecx (Норвегия)	0,95–2,5	6,1	427	$0,25 \times 10^{-3}$	15

С середины 90-х годов хорошо зарекомендовал себя такой гиперспектрометр, как AVIRIS (США), который нашёл применение во многих странах. Близкими характеристиками обладали гиперспектрометры HYDICE и HyMap. Используемые в то время самолётные гиперспектрометры обладали пространственным разрешением 10–20 м на высотах порядка 3 км. В настоящее время гиперспектрометры типа AVIRIS продолжают совершенствоваться и, в частности, в 2016 г. появилась его модернизированная версия – AVIRIS-NG.

Приборы нового поколения (Pika NIR, SWIR-384, SWIR-640, Aisa Fenix-1k, SASI, ODIN-1024) обладают мгновенным угловым полем зрения (IFOV) менее 1×10^{-3} рад, что позволяет им получать изображения с детальностью до одного метра при высоте полета носителя 1 км. Кроме того, гиперспектрометры SWIR-384 и ODIN-1024 имеют в своём составе почти в два раза больше спектральных каналов, а их ширина равняется 5,45 и 6,1 нм, соответственно. Существенно улучшены были и другие параметры гиперспектрометров и, в частности, характеристики радиационной и радиометрической калибровки, геометрической верности и отношения сигнал/шум за счёт соответствующего совершенствования программно-аппаратных средств.

Что же касается массогабаритных показателей, то здесь наблюдается большой разброс. Так, на-

пример, SPECIM FX17 обладает весьма малыми габаритами и массой: соответственно, $150 \times 85 \times 75$ мм³ и 1,7 кг. Для сравнения гиперспектрометр ODIN имеет размеры $113,4 \times 42,3 \times 72,6$ см³ и вес – 90 кг. Это связано с тем обстоятельством, что для достижения более качественных технических характеристик разрабатываемых приборов приходится жертвовать увеличением их массогабаритных параметров.

Следует сказать, что в России до настоящего времени не было создано образцов гиперспектрометров ближнего ИК диапазона 900–1700 нм. Поэтому разработанный в ЗАО «НПЦ «Реагент» гиперспектрометр БИК1 может рассматриваться как первый отечественный сенсор указанного диапазона.

КОНСТРУКЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА БИК1, ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Гиперспектрометр создан по схеме push broom. Техническим результатом разработки является возможность формирования гиперспектрального изображения земной поверхности в диапазоне длин волн $\lambda = 900–1700$ нм узкой поперечной полосой области обзора при перемещении летательного аппарата или же в наземных и лабораторных условиях с помощью поворотного устройства.

Конструкция и технические характеристики гиперспектрометра БИК1

Гиперспектрометр, оптическая система которого приведена на рис. 1, содержит входной объектив 1, диафрагменный узел 2, коллиматор 3, состоящий из двух секций 4 и 5. Для уменьшения габаритных размеров гиперспектрометра коллиматор 3 создан из двух секций 4 и 5, которые были установлены под углом 90° друг к другу. Между секциями коллиматора размещено зеркало 6. За секцией 5 коллиматора установлен диспергирующий блок, выполненный в виде дифракционной решётки 7. Далее по ходу лучей установлен выходной объектив 8 и фотоприёмное устройство 9.

В ходе модельных экспериментов с помощью программы Zemax были выполнены расчёты координат хода лучей в гиперспектрометре и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприёмной матрицы на предмет выбора оптимальной конструкции гиперспектрометра и оценки его потенциальной пространственной разрешающей способности.

Было показано, что размеры пятен рассеяния лежат в диапазоне от 1,7–10 мкм в зависимости от длины волны λ и углового поля зрения 2ω вдоль поперечной полосы области обзора (см. табл. 2). Таким образом, пятно рассеяния оказывается существенно меньше размеров пиксела использованной матрицы (30×30 мкм²). При фокусном расстоянии объектива в 15,4 мм размер пиксела на земной поверхности с высоты съёмки в 1 км будет равен 2 м (что соответствует угловому разрешению 2×10^{-3} рад). На основе этих расчётов и была выбрана конструкция гиперспектрометра.

Таблица 2. Среднеквадратические и геометрические размеры пятен рассеяния

2 ω , град	λ , нм				
	900	960	1160	1480	1700
<i>Среднеквадратический размер пятна рассеяния, мкм</i>					
0	3,4	3,3	1,7	2,9	3,2
12	3,8	3,9	2,4	2,4	3,9
18	4,3	4,5	3,2	2,3	2,9
26	4,8	5,2	4,4	2,9	3,1
35	6,0	6,0	5,3	3,3	4,5
<i>Геометрический размер пятна рассеяния, мкм</i>					
0	6,1	6,2	3,4	5,6	6,6
12	6,9	7,2	5,0	4,8	5,9
18	7,5	8,0	6,4	5,0	6,2
26	8,3	8,7	7,9	6,2	6,0
35	10,1	10,1	8,3	6,2	7,8

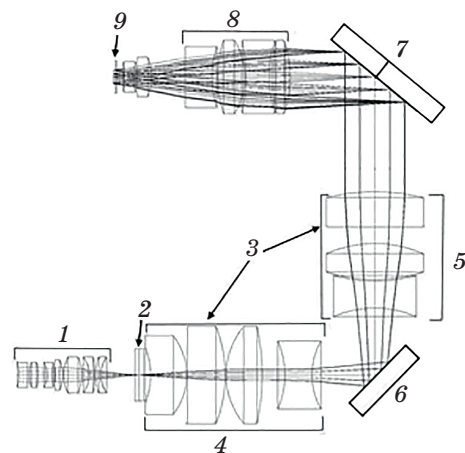


Рис. 1. Оптическая система гиперспектрометра ближнего ИК диапазона.



Рис. 2. Внешний вид гиперспектрометра БИК1.

Корпус гиперспектрометра, внешний вид которого показан на рис. 2, выполнен в виде герметичного блока с заполнением внутреннего объёма сухим азотом особой чистоты, причем корпус снабжен системой термостабилизации, позволяющей подогревать оптико-механические узлы.

Гиперспектрометр функционирует следующим образом. Излучение ближнего ИК диапазона попадает во входной объектив 1. Объектив служит для формирования изображения в фокальной плоскости диафрагменного узла 2, щель которого, шириной 30 мкм, вырезает узкую полосу изображения зондируемой поверхности. Далее это излучение с выхода щели проходит через коллиматор 3. Так как для уменьшения габаритов коллиматор выполнен из двух секций 4 и 5 излучение после прохождения первой секции 4 попадает на отклоняющее зеркало 6, а затем проходит вторую секцию 5 коллиматора. Совместно с коллиматором 3 входной объектив образует телескопическую систему, направляющую излучение в диспергирующий блок 7. В качестве диспергирующего блока применена дифракционная решётка. После диспергирующего блока разложенное по спектру излучение через выходной объектив 8 попадает

Таблица 3. Технические характеристики гиперспектрометра БИК1

Наименование параметра	Значение
Спектральный диапазон, нм	900–1700
Угол поля зрения, град	35
Ширина спектрального канала, нм	3,2
Число спектральных каналов	250
Число пикселей по пространственной координате	320
Угловое разрешение, рад	2×10^{-3}
Масса, кг	8

на матрицу фотоприёмного устройства 9, на которой формируется гиперспектральное изображение.

В качестве фотоприёмного устройства использована камера с матрицей InGaAs PIN-фотодиодов с термоэлектрическим охлаждением, интеллектуальной системой коррекции по трём точкам изображения, спектральным диапазоном 900–1700 нм с числом элементов 320×256 , размер которых 30×30 мкм².

Основные характеристики гиперспектрометра БИК1 приведены в табл. 3.

В результате сравнения характеристик гиперспектрометра БИК1 (табл. 3) с зарубежными аналогами (табл. 1) можно заключить, что он находится на уровне лучших мировых образцов.

Лабораторные испытания гиперспектрометра БИК1

С помощью монохроматора была проведена калибровка гиперспектрометра по спектральным каналам. Для проверки калибровки было использовано излучение эталонных спектральных ламп.

На рис. 3 показан измеренный БИК1 спектр ртутной лампы, а в табл. 4 приведены паспортные данные этого спектра, а также разница между

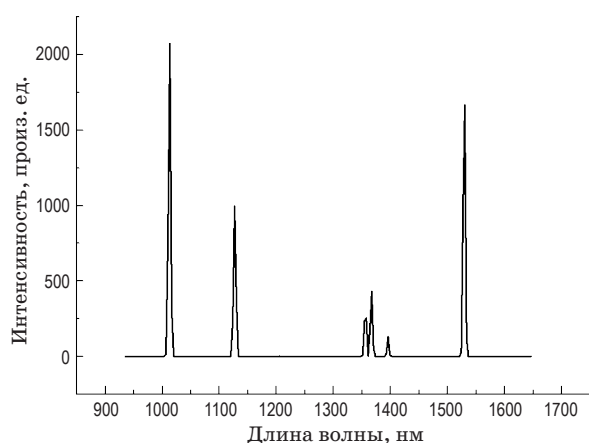


Рис. 3. Спектр ртутной лампы.

Таблица 4. Значения длин волн для пиков спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром БИК1, и паспортные значения длин волн пиков спектра ртутной лампы

№ пп	Длины волн, измеренные БИК1-гиперспектрометром, нм	Паспортные длины волн спектральных линий ртутной лампы, нм	Разность соответствующих длин волн, нм
1	1013,69	1013,98	+0,29
2	1127,1	1128,74	+1,64
3	1357,92	1357,02	–0,9
4	1367,44	1367,35	–0,09
5	1530,54	1529,58	–0,96

измеренными и паспортными значениями длин волн.

Определенное на основе данных табл. 4 средне-квадратическое отклонение измеренных значений длин волн от паспортных оказалось равным 0,95 нм. Таким образом, неопределенность истинного положения измеряемых спектральных линий значительно меньше ширины спектрального канала, что свидетельствует о правильности заложенных при проектировании гиперспектрометра параметров и его хорошее техническое исполнение.

Также были определены калибровочные процедуры для коррекции спектральных и пространственных дисторсий.

Для работы с гиперспектрометром был изготовлен блок предварительной обработки, который способен проводить инициализацию гиперспектрометра, управлять им, получать и передавать данные с него по интерфейсу CameraLink. Встроенный вычислитель блока осуществляет предварительную обработку данных по указанным выше калибровочным процедурам и полученные калиброванные данные выдаются пользователю по интерфейсу Ethernet.

ЛЁТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА БИК1

Целью проводимых лётных испытаний на самолёте АН-2 была проверка работоспособности гиперспектрометра БИК1.

Гиперспектрометр был установлен на гиросtabilизированной платформе Somag SSM 350. Измерения проводились при скорости самолёта 120 км/ч, высота полёта была порядка 1 км, в безоблачную погоду, высота Солнца над горизонтом

была 53–55 град. Гиперкубы изображений земной поверхности регистрировались на бортовом компьютере. Их обработка проводилась в камеральных условиях.

На рис. 4 показано типичное RGB-изображение, полученное гиперспектрометром БИК1.

Цифрами на рис. 4 показаны площадки (красные кружки), выделенные для спектрального изучения: 1 — зелёная трава, 2 — асфальтовая дорога, 3 — пашня, 4 — грунтовая дорога.

Кроме того, на изображении визуально хорошо различаются территории, занятые дачными участками, лесным массивом, полянами.

На основе гиперкуба для RGB-изображения (рис. 4) в ходе его обработки были получены значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) для выбранных участков зондируемой поверхности (рис. 4). На рис. 5 приведены графики измеренных значений спектральной плотности энергетической яркости для площадок 1–4 (см. рис. 4) в относительных единицах, которым присвоены соответствующие номера на графиках. Под номером 5 на рисунке приведен график интенсивности падающего солнечного излучения на уровне моря [7].



Рис. 4. RGB-изображение, полученное гиперспектрометром БИК1.

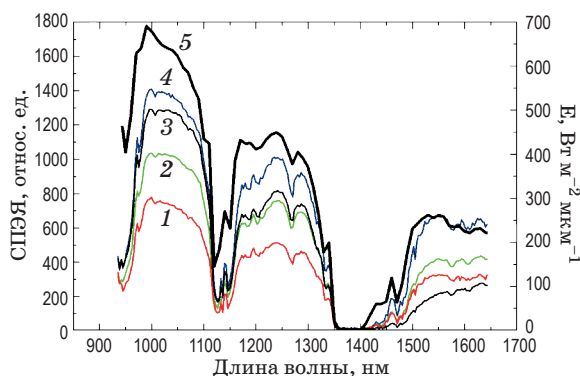


Рис. 5. Графики значений спектральной плотности энергетической яркости для площадок 1–4 (рис. 4): 1 — зелёная трава, 2 — асфальтовая дорога, 3 — пашня, 4 — грунтовая дорога, 5 — интенсивность солнечного излучения на уровне моря [7] (показана чёрным цветом).

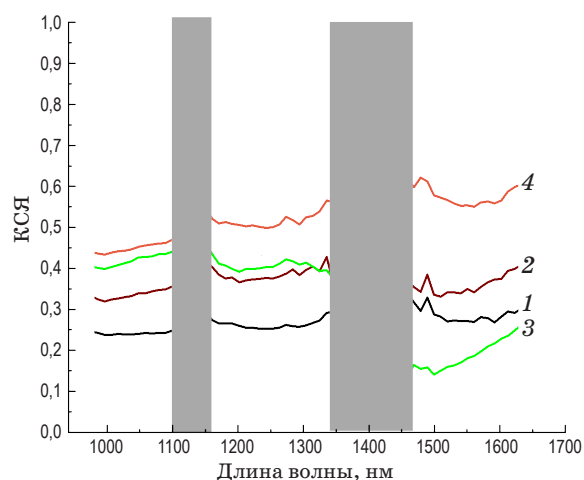


Рис. 6. Графики измеренных значений КСЯ для площадок (1–4), показанных на рис. 4.

Для пересчёта значений СПЭЯ в значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в качестве эталонных использовались величины интенсивности излучения, восходящего от калиброванного отражателя белого цвета. Переход от СПЭЯ к КСЯ позволяет в значительной степени исключить влияние атмосферы на результаты спектральных измерений.

На графиках рис. 5 хорошо видны провалы значений СПЭЯ в области 1120 и 1400 нм, обусловленные поглощением солнечного излучения водяным паром. Этот эффект приводит к появлению соответствующих областей неопределённости, возникающих при пересчете СПЭЯ в КСЯ. В связи с этим указанные области на графиках КСЯ (рис. 6) закрашены серым цветом.

Из анализа графиков КСЯ следует, что три (асфальтовая дорога, пашня, грунтовая дорога) из четырех графиков имеют практически нейтральный характер и отличаются лишь своей интенсивностью. В то же время спектр травы демонстрирует довольно значительное снижение своего уровня в интервале длин волн 1300–1500 нм. Отмеченное существенное различие спектров зондируемых объектов указывает на возможность их уверенной классификации и оценки параметров состояния.

В целом, по полученным из анализа рис. 4–6 результатам, можно заключить, что они адекватно отражают рассеивающие свойства зондируемых объектов (см., например, спектры из работы [8]), что указывает на корректную работу гиперспектрометра БИК1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гиперспектрометр ближнего ИК диапазона БИК1, разработанный и созданный в ЗАО «НПЦ «Реагент», представляет собой эффективный инстру-

мент для решения ряда научных и прикладных задач аэрокосмического мониторинга земной поверхности и др., сопоставимый с лучшими зарубежными аналогами. Лабораторные и лётные испытания сенсора продемонстрировали его работоспособность и подтвердили правильность основных технических решений, заложенных в его конструкцию. Созданный гиперспектрометр может исполь-

зоваться как для решения научных задач (исследованиях процессов горения и взрыва, в медицинских экспериментах и т.п.), так и в хозяйственных отраслях, в частности, мониторинга состояний сельскохозяйственных угодий и лесных массивов, обнаружения и контроля пожаров, определения экологического состояния воздушного бассейна городов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1980. Т. 1. 280 с.
2. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И. Проблемы аэрокосмической спектрометрии земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 2. С. 66–75.
3. Архипов С.А., Ляхов А.Ю., Тарасов А.П. Работы ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» по созданию гиперспектральных приборов дистанционного зондирования // Тезисы докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». КОНТЕНАНТ. 2013. С. 25–30
4. Горбунов Г.Г., Жарников В.Б., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Гипер- и ультраспектральная видеоспектрометрия в задачах дистанционного зондирования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2015. № 5. С. 188–198.
5. 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. № 9. P. 983–1003.
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 // Journal of Optical Technology. 2016. V. 83. Is. 4. P. 237–243.
7. Sources of radiation. The infrared and electro-optical systems handbook / Ed. by George J. Zissis // SPIE Optical Engineering Press. 1993. V. 1. 373 p.
8. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. 2007. USGS Digital Spectral Library splib06a. U.S. Geological Survey. Data Series 231.