

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 28.835.042.3

ЛИНЕЙКА АВИАЦИОННЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО, ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ

© 2016 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

^{*}Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

^{**}Институт космических исследований РАН, Москва

^{***}Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва

^{****}Научно-производственный центр "Реагент", Москва

E-mail: victor_egorov@mail.ru

Приводится краткое описание линейки гиперспектральных сенсоров, изготовленных ЗАО "НПЦ "Реагент". Эти приборы по своим основным характеристикам (пространственное и спектральное разрешение – 0,3 м с высоты 1 км и 0,2 нм в сине-зеленой области спектра, соответственно, число спектральных каналов – до 500, вес и габариты) не уступают мировым аналогам. Дается описание макета гиперспектрометра, предназначенного для многоракурсной съемки объектов зондирования. Указывается, что новые разрабатываемые сенсоры предполагается снабдить поляризационными анализаторами.

Ключевые слова: гиперспектрометр, объектив, коллиматор, призма, фотоприемная матрица, диафрагменный узел, диспергирующее устройство, поляризационный анализатор, спектр, разрешение.

Коды OCIS: 280.0280, 110.4234.

Поступила в редакцию 28.05.2015.

Введение

Современные гиперспектрометры авиационного базирования позволяют получать высокодетальную пространственную и спектральную информацию о типе и состоянии зондируемых природных и антропогенных объектов земной поверхности, а также о различных динамических процессах, например, процессах горения и взрыва. Интерес, проявляемый к такого рода приборам, объясняется тем, что гиперспектральные данные об исследуемых объектах и явлениях заключают в себе максимальное количество полезной информации, содержащейся в поступающем в сенсор излучении [1].

В связи с этим данные гиперспектральных измерений особенно полезны для решения таких сложных научных и прикладных задач, как исследование зависимости спектральных сигнатур зондируемых объектов от параметров их

состояния, обнаружение малоразмерных объектов на фоне подстилающей поверхности, идентификация состава объектов и происходящих в них процессов, определение различий между очень близкими классами объектов, оценка их биохимических и геофизических параметров и т.п. Действительно, оптические спектры различных материалов, чей состав становится известен благодаря модельным расчетам лабораторным и натурным полигонным измерениям, собираются в библиотеки или базы данных (БД) спектральных сигнатур вместе с набором связанных с ними предметно-специфических характеристик (ПСХ) – параметров состояния зондируемых объектов. Эти библиотеки и БД используются для автоматизированного дешифрирования гиперспектральных снимков и последующего решения задач дистанционного зондирования.

В России и за рубежом разработка бортовых гиперспектрометров получила развитие

с начала 80-х годов прошлого столетия [2]. В настоящее время среди отечественных разработчиков таких сенсоров следует выделить ЗАО “НПЦ “Реагент”, в котором была создана линейка современных гиперспектрометров, по своим основным параметрам не уступающих лучшим зарубежным образцам. Кроме того, в ЗАО “НПЦ “Реагент” постоянно проводятся исследования и конструкторские разработки, направленные на совершенствование гиперспектральных приборов [3–12].

В связи с этим целью настоящей статьи является анализ тенденций в области разработки и создания новых образцов гиперспектральных сенсоров, описание линейки гиперспектров ЗАО “НПЦ “Реагент”, их тактико-технических характеристик и результатов летных испытаний, а также рассмотрение отдельных перспективных направлений в области совершенствования бортовых авиационных гиперспектральных сенсоров.

Современное состояние гиперспектральных разработок

Ретроспективный взгляд на развитие гиперспектрометрии, как одного из наиболее актуальных направлений в области дистанционного зондирования (ДЗ) Земли с авиационных носителей, а также неразрушающего контроля при исследованиях физико-химических свойств ма-

териалов и различного рода динамических процессов (например горения и взрыва [13]) позволяет проследить качественные и количественные изменения в конструкции и возможностях разрабатываемых сенсоров.

В конце 20-го и начале 21-го веков за рубежом было разработано более десяти образцов бортовых гиперспектрометров авиационного зондирования таких как AVIRIS, HYDICE, HyMap, ROSIS и др. Первый изображающий спектрометр (видеоспектрометр) в СССР был создан в Институте космических исследований АН СССР в 1980 году [2]. Макет этого прибора прошел летные испытания, однако дальнейшего развития эти исследования тогда не получили.

В настоящее время в России основными разработчиками авиационных гиперспектрометров являются Закрытое акционерное общество “Научно-производственный центр “Реагент” (ЗАО “НПЦ “Реагент”), Открытое акционерное общество “Красногорский завод им. С.А. Зверева” и Закрытое акционерное общество “Научно-производственное объединение “ЛЕПТОН” (ЗАО “НПО “ЛЕПТОН”). Разработки двух последних носят экспериментальный характер и созданные ими сенсоры по своим параметрам уступают аналогам, разработанным ЗАО “НПЦ “Реагент”.

Анализ тактико-технических характеристик и конструктивных особенностей наиболее распространенных бортовых авиационных за-

Таблица 1. Гиперспектрометры зарубежного и отечественного производства

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
HyMap	Integrated Spectronics (Австралия)	0,45–2,5	14,3	126	2×10^{-3}	60
CASI 1500 (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited (Канада)	0,38–1,05	2,4	288	$0,5 \times 10^{-3}$	40
Probe-1	Earth Search Sciences Inc. (США)	0,4–2,5	12–16	128	1×10^{-3}	30
RODIS	DLR (Германия)	0,43–0,86	4,0	115	$0,56 \times 10^{-3}$	16
AISA Hawk (SWIR Hyperspectral System)	Spectral imaging (Финляндия)	1,0–2,5	5,5	254	1×10^{-3}	18
АГСМТ-1	ЗАО “НПЦ “Реагент” (Россия)	0,55–0,86	1,5–10	250	1×10^{-3}	12

рубежных и отечественных гиперспектрометров (табл. 1) позволяет заключить следующее:

– для достижения высоких значений спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометров предусмотрено их модульное исполнение, при котором весь спектральный диапазон разбивается на несколько поддиапазонов (например в гиперспектрометре AVIRIS их четыре);

– большинство сенсоров работает в режиме “pushbroom”, т.е. обеспечивает поперечный обзор узкой полосы зондируемой поверхности в угловом секторе от 10° до 60° с обеспечением развертки вдоль трассы полета носителя за счет его поступательного движения;

– по своим информационным возможностям в части распознавания типов зондируемых объектов и оценки параметров их состояния гиперспектрометры существенно превосходят много-спектральные сканеры за счет более высокого спектрального разрешения и точности воспроизведения огибающей спектра принимаемого излучения;

– отечественные образцы авиационных гиперспектрометров несколько уступают по своим тактико-техническим характеристикам современным зарубежным аналогам в части охвата более узкого спектрального диапазона, пространственного и спектрального разрешения.

Вместе с тем современные методы проектирования авиационных гиперспектрометров и новые конструкторские и технологические решения, заложенные в их разработку, указывают на возможность создания перспективных образцов сенсоров данного типа.

Линейка гиперспектрометров, разработанных ЗАО “НПЦ “Реагент”

*Одноцелевые гиперспектральные модули,
построенные по схеме pushbroom*

В период 2011–2013 гг. в ЗАО “НПЦ “Реагент” была разработана линейка малогабаритных гиперспектральных модулей УФ-ВИД, ВИД-ИК1, ВИД-ИК2 и ВИД-ИК3. Все они выполнены по единой оптической схеме pushbroom с единственной щелью, ориентированной перпендикулярно проекции линии полета. Конструктивно каждый модуль линейки выполнен в виде моноблока без единой крепежной плиты.

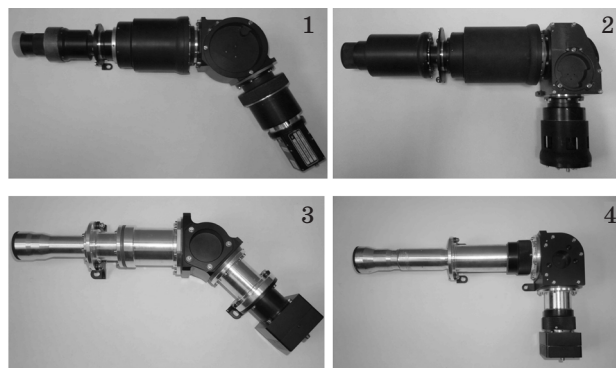


Рис. 1. Линейка гиперспектральных модулей. 1 –модуль УФ-ВИД (0,30–0,5 мкм); 2 – модуль ВИД-ИК1 (0,45–1,0 мкм) (с термостабилизацией); 3 – модуль ВИД-ИК2 (0,45–0,9 мкм); 4 – модуль ВИД-ИК3 (0,4–1,0 мкм).

На рис. 1 представлены фотографии модулей указанной выше линейки. Модули диапазона ВИД-ИК имеют небольшие вариации по значениям спектрального диапазона и отличаются друг от друга по величине угла поля зрения, и потому выбор конкретного модуля должен определяться комплексом решаемых задач. Различные значения угла поля зрения гиперспектральных модулей достигались за счет изменения фокусного расстояния их входных объективов. Кроме того, модуль ВИД-ИК1 в отличие от трех других модулей снабжен системой термостабилизации, что привело к увеличению его массы до 11 кг. Технические характеристики гиперспектральных модулей приведены в табл. 2.

В ходе модельных экспериментов с помощью программы Zemax были выполнены расчеты хода лучей в гиперспектрометре и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприемной матрицы на предмет оценки потенциальной пространственной разрешающей способности гиперспектральных модулей. На основе этих расчетов были выбраны оптимальные конструкции гиперспектрометров и их основных оптических узлов: входного объектива, щелей диафрагменного узла, коллиматора, диспергирующего узла (стеклянная призма), выходного объектива и фотоприемной матрицы. На рис. 2 приведен пример расчета пятен рассеяния для модуля ВИД-ИК3 при различных углах визирования точечного источника (0° , $6,3^\circ$, $9,0^\circ$, $12,6^\circ$ и 18° – точки 1–5) и для двух длин волн (450 и 900 нм).

Из анализа рис. 2 следует, что размеры пятен лежат в диапазоне от 8 до 16 мкм, что при фокусном расстоянии модуля в 17 мм и размере

Таблица 2. Характеристики гиперспектральных модулей

№ пп	Характеристика	Гиперспектральные модули			
		УФ-ВИД	ВИД-ИК1	ВИД-ИК2	ВИД-ИК3
1	Спектральный диапазон, мкм	0,30–0,55	0,45–1,0	0,45–0,9	0,4–1,0
2	Угловое поле, град	60	60	20	35
3	Пространственное разрешение с высоты 1 км, м	от 0,3			
4	Число каналов	до 500			
5	Частота кадров, 1/с	до 100			
6	Масса, кг	6,6	11	1,95	3,2
7	Габариты (Д×Ш×В), мм ³	590×310×102	575×315×135	400×180×80	425×230×84

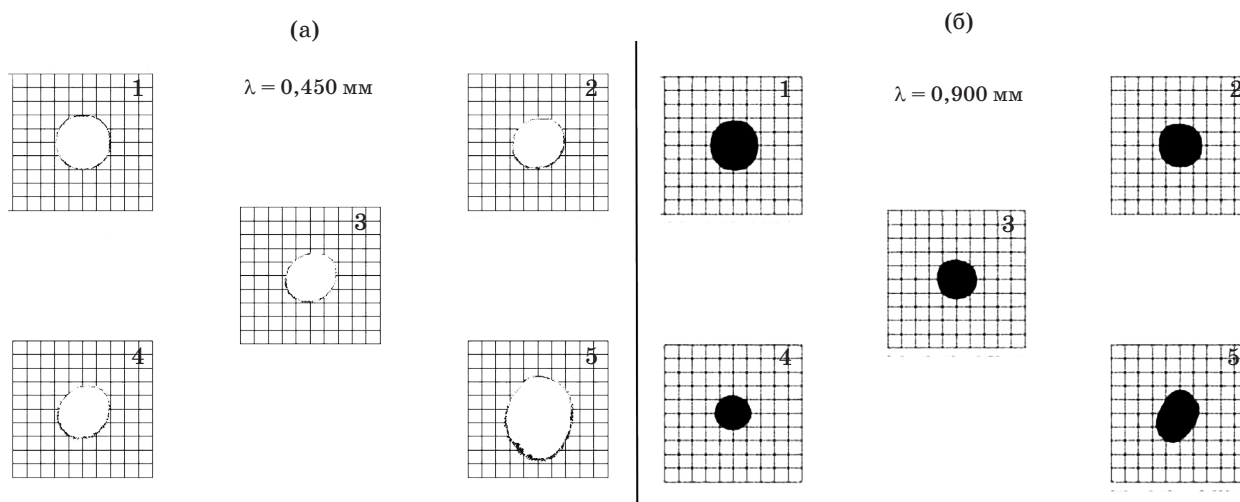


Рис. 2. Пятна рассеяния точки в плоскости изображения. (а) – для длины волны 450 нм; (б) – для длины волны 900 нм.

детекторных элементов фотоприемной матрицы в 5,5 мкм будет соответствовать размерам пиксела на земной поверхности с высоты съемки в 1 км от 0,3 до 0,6 м.

В гиперспектрометрах могут использоваться различные диспергирующие элементы: дифракционная решетка на отражение или пропускание, голографическая решетка, призма, сочетание призм, сочетание оптических клиньев и дифракционной решетки и др. Одним из наиболее распространенных вариантов реализации диспергирующего элемента является стеклянная призма. Для спектральных приборов призмы изготавливают из флинтгов и тяжелых флинтгов, поскольку эти стекла обладают высокими показателями преломления и дисперсией. Преломляющий угол у простой призмы обычно 60° или близкий к этому. В этом случае еще не происходит полного внутреннего отражения

от второй поверхности и достигается высокая дисперсия. Для обеспечения величины преломляющего угла в 90° (для гиперспектрометров ВИД-ИК1 и ВИД-ИК2) с целью уменьшения размеров модулей также использовалась призма Аббе. В описываемых гиперспектральных модулях применялись стеклянные призмы обоих типов.

Все гиперспектральные модули снабжены компактной системой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени. В случае использования разработанных гиперспектрометров на авиационных носителях они интегрируются с бортовой навигационной системой и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Эти системы адаптируются по требованию потребителя к конкретным носителям и целевым назначениям.

Описанные выше однощелевые гиперспектрометры, осуществляющие съемку Земли в режиме pushbroom, обеспечивают получение информации об индикатрисе рассеяния зондируемых объектов лишь в плоскости, перпендикулярной плоскости полета носителя. Однако индикатриса рассеяния не всегда является осесимметричной. В связи с этим, представляется целесообразным исследование индикатрисы в плоскости, проходящей через вектор скорости носителя, перпендикулярно земной поверхности. Реализация такого метода зондирования предполагает наличие нескольких (до 5–7) параллельных щелей в диафрагменном узле сенсора [6, 9, 10]. Часть таких щелей ориентирована “вперед” относительно центральной, ориентированной в надир, а другие – периферийные, соответственно, “назад”. Это позволяет получать достаточно полные сведения об индикатрисах зондируемых объектов. Кроме того, такой режим съемки позволяет заранее обнаруживать интересующие потребителя объекты в процессе полета и отслеживать их рассеивающие свойства и пространственно-временную динамику. В ЗАО “НПЦ “Реагент” была разработана конструкция и создан макет трехщелевого гиперспектрометра.

На рис. 3 в качестве примера приведена оптическая схема трехщелевого гиперспектрометра.

Рассмотрим работу многощелевого гиперспектрометра на примере сенсора с тремя щелями. Восходящие от зондируемой поверхности световые сигналы попадают во входной объектив 1, который формирует изображение объекта на диафрагменном узле. Каждая щель выделяет

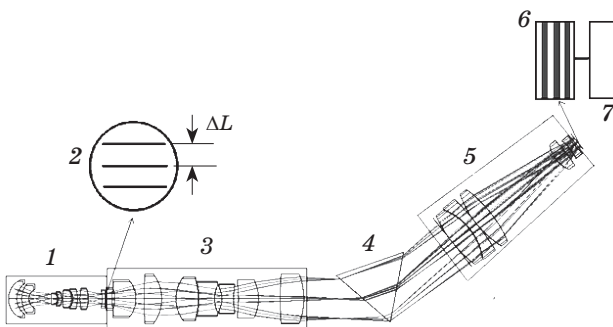


Рис. 3. Оптическая схема трехщелевого гиперспектрометра. 1 – входной объектив; 2 – диафрагменный узел с тремя щелями; 3 – коллиматор; 4 – стеклянная призма; 5 – выходной объектив; 6 – фотоприемная матрица; 7 – система регистрации данных.

ет изображение узкой полоски поперек трассы полета (ось Y), шириной в пиксел, видимой под тремя углами (рис. 4). При этом соответствующие изображения поверхности формируется за счет поступательного движения носителя вдоль проекции на ось X . Далее эти три изображения проходят через коллимирующий узел 3, попадают на диспергирующий элемент 4, в качестве которого может использоваться стеклянная призма. После диспергирующего элемента разложенные по спектру изображения через выходной объектив 5 попадают на матрицу фотоприемного устройства 6, на которой формируются три независимых гиперспектральных изображения, так как каждая щель работает самостоятельно.

Матрица управляется электронным блоком 7, в состав которого входит устройство считывания изображений, встроенный процессор, осуществляющий предварительную обработку изображений, передачу данных на модуль хранения или же для дальнейшей тематической обработки на систему обработки данных, снабженную высокопроизводительным компьютером.

Каждое изображение на фотоприемной матрице формируется при различных центральных углах визирования ω мгновенной полосы обзора (жирные линии) на поверхности Земли, а $2\omega_0$ – полное поле зрения объектива (рис. 4).

Угол α определяются формулой

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta L / f'_1,$$

где ΔL – расстояние между рассматриваемой щелью и центральной щелью (рис. 1), f'_1 – фокусное расстояние входного объектива.

Рассмотрим теперь пример проектирования оптической системы (с элементами, показанными на рис. 3) трехщелевого гиперспектрометра

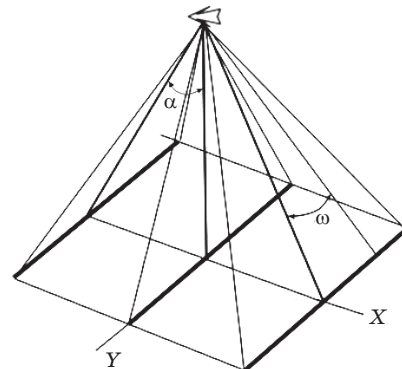


Рис. 4. Углы визирования для трехщелевого диафрагменного узла.

с диспергирующим узлом в виде призмы, для которого заданы следующие исходные данные: спектральный диапазон – 450–900 нм, полное поле зрения – $2\omega_0 = 40^\circ$, размер эффективного пиксела фоточувствительной матрицы 13×13 мкм², требуемое угловое разрешение – 1 мрад (для длины волны $\lambda = 600$ нм), относительное спектральное разрешение (для длины волны $\lambda = 600$ нм) – 300; геометрическая светосила – не менее $(1/2,8)^2$; средний диаметр пятна рассеяния не должен превышать размер эффективного пиксела; изображения щелей не должны перекрываться во всем диапазоне чувствительности матрицы, а именно 300–1000 нм.

Входной объектив. Приведем основные обозначения и формулы, используемые для расчета. Фокусное расстояние f'_1 входного объектива определяется из соотношения

$$f'_1 = y_2 / \text{tg}\omega_0,$$

где $2y_2$ – высота щели (линейное поле в пространстве изображений входного объектива см. рис. 3).

Высоту щели находим из следующего соотношения:

$$y' / y_2 = f'_5 / f'_3,$$

где $2y'$ – линейное поле по оси Y в пространстве изображений гиперспектрометра, равное высоте матрицы ($2y' = 24$ мм); f'_3 – фокусное расстояние коллимационного объектива 3; f'_5 – фокусное расстояние выходного объектива 5.

Приняв соотношение фокусных расстояний коллиматора и выходного объектива $f'_5 / f'_3 = 1$, находим требуемое фокусное расстояние входного объектива $f'_1 \approx 19,23$ мм. Геометрическая светосила входного объектива, как было сказано выше, должна быть не менее $(1/2,8)^2$ и равна светосиле гиперспектрометра, так как выбрано соотношение фокусных расстояний $f'_5 / f'_3 = 1$.

Оценка качества входного объектива и соответствие заданным требованиям пространственного и спектрального разрешения гиперспектрометра проводятся по размеру пятен рассеяния в плоскости изображения входного объектива. Она же – плоскость, в которой расположен диафрагменный узел для различных точек поля. Исходя из размеров пятен, определяется оптимальная ширина щелей диафрагменного узла.

Входной объектив проецирует изображение в плоскость входных щелей диафрагменного узла. Исходя из данной функции объектива и

требуемых характеристик, можно сделать вывод о необходимости исправления в оптической системе таких aberrаций как сферическая кома, астигматизм и кривизна. Особое внимание было уделено исправлению хроматической aberrации положения. Для коррекции хроматизма в схеме входного объектива использованы хроматические пары линз. Положительные линзы выполнены из материала с большим коэффициентом дисперсии, чем отрицательные. Коррекция выбранной исходной оптической схемы входного объектива осуществлялась итерационными способами, т.е. путем последовательных приближений, которые осуществляются решением системы нелинейных уравнений [14]. Решение указанных уравнений направлено на минимизацию оценочной функции

$$F = \sum_{j=1}^k a_j (\Phi_j - \bar{\Phi}_j),$$

где a_j – весовые коэффициенты; Φ_j – текущие значения корректируемых функций (в частности, aberrаций); $\bar{\Phi}_j$ – заданные значения корректируемых функций. Оптимизация системы ведется с помощью программы Zemax дефинированным методом наименьших квадратов. Плоскость входных щелей (диафрагменный узел) в данной оптической системе расположена на последней поверхности входного объектива. Такое расположение диафрагменного узла позволяет с его внешней стороны установить плотно прилегающую к нему оптически прозрачную пластину, а с другой – первую поверхность линзы коллиматора. Это предотвращает попадание частиц пыли в область щели и позволяет избежать связанного с этим появления полос на гиперспектральном изображении. Входной объектив рассчитан на угловое поле в пространстве предметов $2\omega_0 = 40^\circ$. Три щели диафрагменного узла, расположенные в соответствии с рис. 3 с $\Delta L = 4,61$ мм, дают возможность получать изображение объектов, соответствующих углам обзора полосы $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = \pm 14^\circ$ в направлении координатной оси X .

Коллиматор. Расчет коллиматора проводился с учетом остаточных aberrаций входного объектива. Коллиматор (рис. 3) построен по симметричной схеме. Данная схема обеспечивает низкие значения aberrаций наклонных пучков лучей, что актуально при наличии трех щелей.

Призма. Сформированные коллиматором параллельные пучки лучей попадают на диспер-

гирующий элемент (в данной оптической системе – призму). Материал и преломляющий угол призмы выбирались таким образом, чтобы выполнить требования по спектральному разрешению, и чтобы изображение спектра, построенное выходным объективом, не вышло за границы приемной матрицы. Для удобства данной оценки до расчета выходного объектива в программе Zemax после призмы была использована параксиальная поверхность с фокусным расстоянием, равным фокусному расстоянию коллиматора (для обеспечения единичного линейного увеличения оптической системы коллиматор–выходной объектив). В результате в качестве диспергирующего элемента была выбрана равносторонняя призма из стекла марки BK7 (Schott) со стороной 60 мм.

Выходной объектив. Выходной объектив рассчитывался отдельно от остальной системы, так как предполагалось, что при сборке юстировка данного объектива будет проводиться отдельно. Исходные данные для расчета (фокусное расстояние, угловое поле в пространстве предметов и диаметр апертурной диафрагмы) были получены после выбора призмы из анализа хода лучей до параксиальной поверхности, которая замещала выходной объектив на предыдущем этапе расчета.

Выходной объектив был построен по схеме телеобъектива, что при большом фокусном расстоянии ($f'_2 \approx 100$ мм) позволяет несколько сократить его габариты. Изображение проецируется в плоскость матрицы фотоприемного устройства, расположенной на расстоянии 3,6 мм от последней поверхности выходного объектива.

Оптическая схема гиперспектрометра. По результатам сквозного расчета была получена оптическая схема трехщелевого гиперспектрометра.

Основные характеристики разработанной оптической системы, полученные в результате расчета, оказались равными: геометрическая светосила – $(1/2,7)^2$, диаметр входного зрачка – $D = 7$ мм.

Таким образом, значение геометрической светосилы удовлетворяет заданной величине.

Расположение входных щелей соответствует трем значениям центральных углов визирования α : 0° , 14° , -14° .

Многощелевой гиперспектрометр представляет собой принципиально новое устройство дистанционного зондирования Земли, не имеющее мировых аналогов, позволяющее получать

изображения одновременно в нескольких углах визирования (ракурсах). Наряду с достоинствами традиционных однощелевых гиперспектрометров многощелевой (многоракурсный) сенсор наиболее перспективен для изучения угловых отражательных свойств земной и морской поверхности, анализа ее пространственной структуры (в частности, структуры морской поверхности), а также прикладных задач, например, таких, как распознавания типов морских судов, самолетов, базирующихся на аэродромах и т.п.).

Результаты натурных и лабораторных испытаний гиперспектральных модулей

Разработанные в ЗАО “НПЦ “Реагент” гиперспектрометры могут применяться как с борта авиационных носителей, так и в наземных и лабораторных экспериментах. Целью экспериментов являлась проверка работоспособности входящих в состав указанной выше линейки гиперспектральных модулей в ходе проведения лабораторных и самолетных измерений спектральных характеристик различных природных и антропогенных объектов.

В одном из лабораторных экспериментов изучались возможности гиперспектрометров применительно к исследованию тонкой структуры спектров городской атмосферы (г. Москва), характеризующейся наличием большого числа различных примесей. Так, на рис. 5 показан график нормированного рассеянного атмосферой солнечного излучения, полученный с помощью модуля ВИД-ИК3.

На рис. 5 хорошо видны линии поглощения различных газов и аэрозолей природного и антропогенного происхождения. Анализ спектральной кривой, приведенной на этом рисунке, позволяет утверждать, что на разработанных для серийного производства опытных образцах гиперспектрометров получено не только высокое для широкоугольной гиперспектрометрии пространственное разрешение (около 500 линий в поле зрения), но одновременно, фактически, достигнуто ультраспектральное разрешение (в синезеленой области спектра) порядка 0,2 нм.

Следующим этапом экспериментальных работ явилась установка гиперспектрального модуля ВИД-ИК2 на самолет и проведение съемок с высоты 1 км с целью оценки возможности их пространственной разрешающей способности (см. рис. 6).

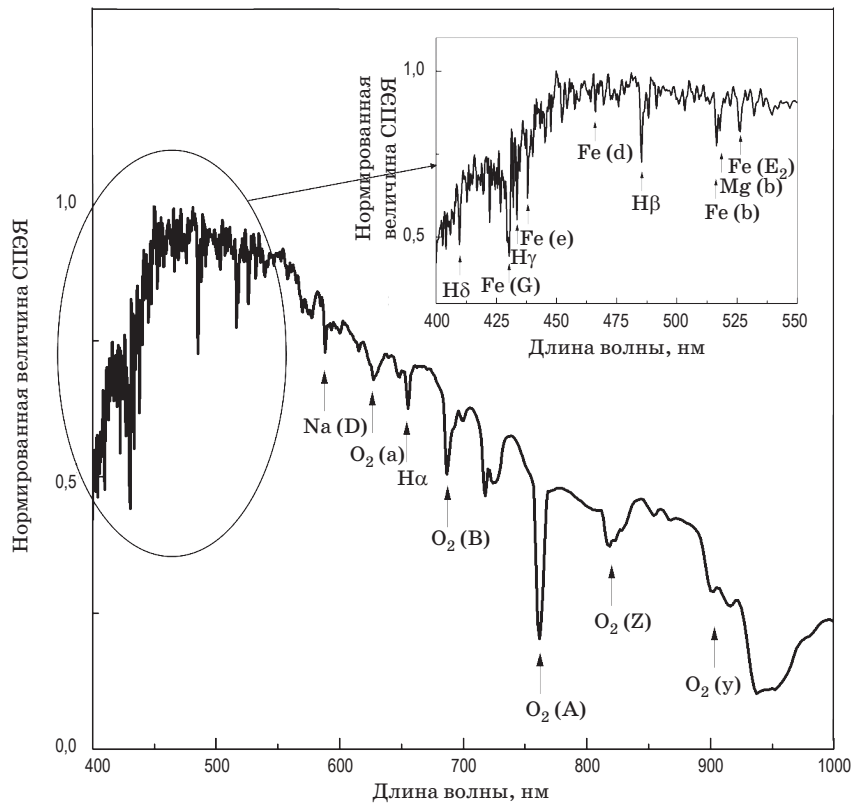


Рис. 5. Нормированный график спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) рассеянного атмосферой солнечного излучения.



Рис. 6. RGB-гиперспектральное изображение просеки в лесу с тремя линиями электропередачи.

На рис. 6 хорошо видны три опоры (светлые участки на изображении) и три провода линий электропередачи, что указывает на высокую пространственную разрешающую способность гиперспектрального модуля порядка 0,3 м.

Результаты натурального эксперимента подтвердили работоспособность разработанных гиперспектральных модулей ВИД-ИК2 и ВИД-ИК3 и их реальную спектральную и пространственную разрешающую способность, соответствующую расчетным параметрам.

Заключение

Современные бортовые авиационные гиперспектрометры обеспечивают получение данных дистанционного зондирования природных и антропогенных объектов в объемах, на порядки превышающие данные многоспектральных сенсоров. В настоящее время в ЗАО “НПЦ “Реагент” разработана целая линейка гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона, предназначенных для решения широкого спектра научных и прикладных задач. Натурные и лабораторные испытания гиперспектральных модулей подтвердили их работоспособность и высокое пространственное (до 0,3 м при высоте полета носителя 1 км) и спектральное (0,2 нм на длине волны 300 нм) разрешение. Стремление потребителей гиперспектральной информации к расширению круга решаемых с ее помощью научных и прикладных задач ставит перед разработчиками сенсоров новые требования. Они связаны с повышением информативности получаемых данных за счет совершенствования параметров сенсоров в части увеличения числа спектральных каналов и их спектрального разрешения, использованием

поляризационных анализаторов, применением режима многокурсового (многоцелевого) зондирования, снижением весовых и габаритных параметров и т.п. Реализация этих требований представляет собой перспективное направление в области создания новых гиперспектральных

сенсоров авиационного дистанционного зондирования. В частности, в ЗАО «НПЦ «Реагент» создан макет многоцелевого гиперспектрометра и выполнены эксперименты по оценке эффективности использования поляризационных анализаторов в гиперспектральных сенсорах.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1980. 280 с.
2. *Аванесов Г.А., Снеткова Н.И.* Проблемы аэрокосмической спектроскопии земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 2. С. 66–75.
3. *Nepobedimiy S.P., Rodionov I.D., Vorontsov D.V., Orlov A.G., Kalashnikov S.K., Kalinin A.P., Ovchinnikov M.Yu., Rodionov A.I., Shilov I.B., Lubimov V.N., Osipov A.F.* Hyperspectral remote sounding of the ground // *Doclady Physics*. 2004. V. 397. № 1–3. P. 411–414.
4. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П.* Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 66–75.
5. *Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д.* Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 8. № 2. С. 101–107.
6. *Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Мельникова Е.М., Родионов А.И., Родионов И.Д., Сысоева Е.Я.* Многокурсовый гиперспектрометр для аэрокосмического дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 316–326.
7. *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.
8. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П.* Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 81–93.
9. *Егоров В.В., Калинин А.П., Мельникова Е.М., Родионов А.И., Родионова И.П.* Многоцелевой гиперспектрометр для дистанционного зондирования Земли под несколькими углами визирования // Датчики и системы. 2014. № 8. С. 26–31.
10. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Калинин А.П., Егоров В.В.* Многокурсовый гиперспектрометр для дистанционного зондирования земной поверхности // Патент России № 121366. 2012.
11. *Родионов И.Д., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионова И.П.* Гиперспектрометр // Патент России № 130698. 2012.
12. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Калинин А.П., Егоров В.В., Виноградов А.Н., Сурдо А.В., Малышкин М.А.* Авиационный гиперспектрометр // Патент России № 130699. 2012.
13. *Калинин А.П., Трошин К.Я., Орлов А.Г., Родионов А.И.* Гиперспектрометр как система контроля и изучения процессов горения и взрыва // Датчики и системы. 2008. № 12. С. 19–21.
14. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н.* Теория оптических систем. Учебник для приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.