

А. П. Калинин, А. Г. Орлов,
И. Д. Родионов

АВИАЦИОННЫЙ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР

Рассмотрены вопросы использования гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне 0,3...1 мкм. Приведено схематическое описание прототипа гиперспектрометра воздушного базирования, созданного НТЦ "Реагент" в кооперации с рядом институтов РАН, а также результаты лабораторных испытаний спектральных и пространственных характеристик прибора. Показано, что принципы, заложенные при проектировании гиперспектрометра, могут быть использованы при разработке новой (в частности, космической) гиперспектральной аппаратуры.

Наиболее распространенной задачей гиперспектральных измерений в оптическом диапазоне 0,3...2,5 мкм является дистанционное зондирование поверхности Земли в целях идентификации объектов и их элементного состава с борта самолетов, вертолетов и космических аппаратов [1–4] (хотя гиперспектрометр может применяться и в лабораторных условиях для различных приложений — например, в медицине, для идентификации личностей [5] и т.п.). Гиперспектральными называются измерения в диапазоне от нескольких сотен до тысячи спектральных каналов, а гиперспектрометром — прибор, осуществляющий одновременно измерение спектральной и пространственных координат.

Идентификация объектов и материалов при гиперспектральных измерениях базируется на способностях этих зондируемых объектов поглощать и отражать световые волны. Фундаментальной основой используемого метода дистанционного зондирования является однозначное соответствие между регистрируемым отраженным оптическим сигналом и элементным составом отражающей поверхности. В качестве подсветки поверхности Земли в дневное время может использоваться солнечное излучение, а в ночное время — лунное и даже излучение звезд. При этом максимум спектральной плотности излучения подсветки приходится на видимый диапазон, а диапазон 0,3...2,5 мкм имеет оптически прозрачные окна для чистой атмосферы.

Информационной характеристикой гиперспектральных измерений является интенсивность излучения, отраженного определенной площадкой на поверхности Земли, в зависимости от значения длины волны регистрируемого излучения λ , компоненты поляризации отраженного излучения и состояния зондируемой поверхности. Высокая

чувствительность коэффициентов отражения разнородных объектов к частоте и поляризации подсвечивающего излучения выделяет гиперспектральный метод среди других методов изучения поверхности Земли. Данные гиперспектральных измерений используются для решения сложных задач обнаружения малых объектов, идентификации их состава и происходящих в них процессов, выделения отличий между очень близкими классами объектов, оценки биохимических и геофизических параметров и т.п. Только гиперспектральные измерения могут выявить малые спектральные различия между отдельными элементами поверхности и служить индикатором интересующих нас объектов и процессов на поверхности Земли.

Переход от традиционной многозональной съемки к гиперспектральной увеличивает не только количество информации, но и обеспечивает совершенно новый, уникальный, качественный характер данных гиперспектральной съемки. Однако извлечь эти новые данные можно только при существенном усовершенствовании методов обработки информации.

В настоящее время основным подходом к обработке многозональных данных, состоящих из 3...5 линий спектра в существующих приборах и до 20...30 линий спектра в перспективных системах, является поиск наиболее информативной для рассматриваемой задачи области спектра и выбор только ее среди множества измеренных линий для дальнейшей двумерной пространственной обработки. Гиперспектральные данные позволяют работать с объектом, не имеющим характерных выделенных линий спектра, и при их обработке использовать весь измеренный спектр. Это качественно отличает гиперспектральный метод дистанционного зондирования от многозонального.

В силу большого числа спектральных каналов гиперспектрометра и сложности решения задач идентификации, о которых говорилось ранее, необходимо обеспечить автоматическую или полуавтоматическую компьютеризированную процедуру обработки гиперспектральной информации и ее интерпретацию.

Основным понятием гиперспектральной съемки является “гиперкуб” — множество данных, образованных значениями интенсивности излучения, отраженного от двумерной поверхности Земли, условно разбитой на элементы изображения — пиксели. Кроме двух стандартных метрических координат, к каждому пикселю добавляется спектральная координата, что обеспечивает трехмерность пространства данных. Кроме того, добавляется еще дискретная поляризационная координата. Таким образом, измеряемые данные представляют собой значения функции, заданной на многомерном пространстве с непрерывными и дискретными аргументами.

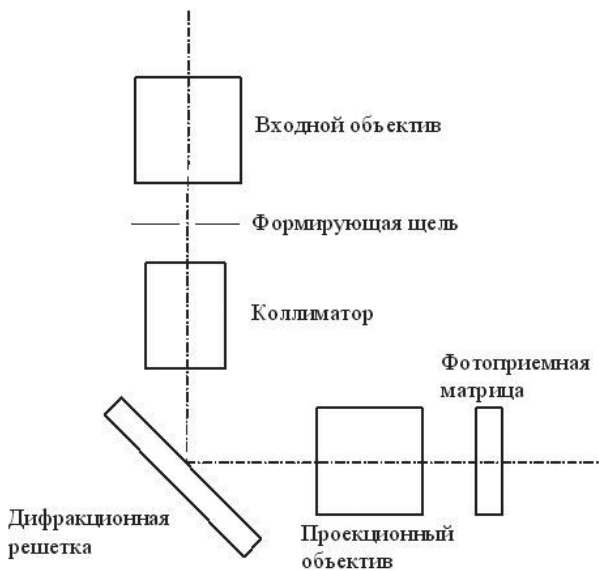


Рис. 1. Принципиальная схема модуля гиперспектрометра

Далее обсуждаются конструкция прототипа гиперспектрометра и его лабораторное испытание. В следующей статье будут рассмотрены вопросы обработки гиперспектральной информации и приведены данные натурных испытаний гиперспектрометра.

Устройство гиперспектрометра и схема проведения лабораторных испытаний. Гиперспектрометр представляет собой набор отдельных модулей, работающих синхронно по полям зрения и съемкам кадра, для разных поддиапазонов частот. Модули завязаны в единую бортовую систему [6] и охватывают ультрафиолетовый (УФ) $\lambda \sim 0,3 \dots 0,4$ мкм диапазон частот, первый $\lambda \sim 0,43 \dots 0,7$ мкм и второй $\lambda \sim 0,66 \dots 0,86$ мкм диапазоны видимого излучения. Результаты измерений всех модулей при обработке объединяются, и получается единая спектральная зависимость во всем исследованном диапазоне частот. Конструктивно модули одинаковы; схема одного такого модуля показана на рис. 1.

Каждый модуль имеет входную апертуру диаметром 3 см и мгновенное поле зрения $12^\circ \times 1'$, что обеспечивает обзор полосы поверхности Земли, размеры которой определяются высотой полета самолета, вертолета или космического аппарата (рис. 2).

В данном приборе используется плоская одномерная дифракционная решетка. Особенностью одномерных решеток является сохранение ими пространственного распределения светового потока по одной из координат и развертывание (отклонение) по другой координате плоского потока спектральной линии в зависимости от длины волны. Угол

Входная
апертура

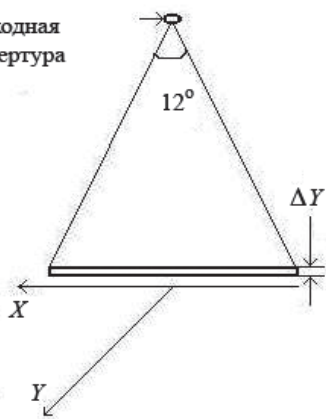


Рис. 2. Полоска поверхности Земли, проецируемая на вход фотоприемного устройства. Величина полоски по Y определяется углом $1'$ и высотой полета

бор спектральных зависимостей отраженного от поверхности Земли излучения в зависимости от координаты x определенного участка поверхности Земли. Вследствие того, что самолет (или вертолет, а в будущем и космический аппарат), на котором находится гиперспектрометр, движется вдоль координаты y (см. рис. 2), то происходит своего рода сканирование поверхности Земли в направлении Y .

Первичная обработка изображения. В качестве фотоприемного устройства используется матрица активных пикселей IBIS-5. Для управления матрицей, организации съема и сохранения цифровых видеоданных применена программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Virtex2Pro со встроенным процессором PowerPC. Сохраняются видеоданные на жестком диске с интерфейсом IDE, емкостью 400 Гб.

На рис. 3 показан один кадр видеоизображения летного эксперимента, поступающего непосредственно с одного из модулей прибора для канала второго видимого излучения ($\lambda \sim 0,66 \dots 0,86$ мкм). Фактически на кадре по оси абсцисс отложена длина волны λ , а по оси ординат — координата x участка Земли.

Из-за аппаратных особенностей гиперспектрометра (оптической части прибора, конструкции фотоприемного устройства) при обработке данных используется не весь видеокادر с каждого модуля, а некоторая его рабочая область (показана белой рамкой на рис. 3). В результате при разрешении фотоприемной матрицы 1280×1024 пикселей получаемое эффективное разрешение рабочей области оказывается порядка 500×500 . На рисунке хорошо видны линии поглощения

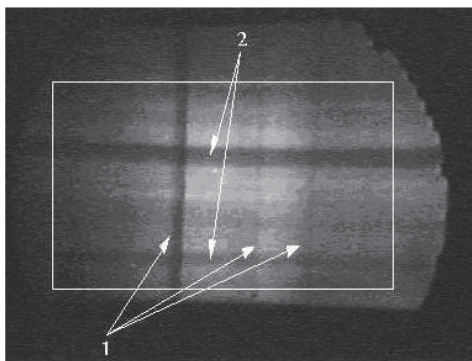


Рис. 3. Необработанный кадр видеозображения с одного из модулей прибора $\lambda \sim 0,66 \dots 0,86$ мкм (данные летного эксперимента)

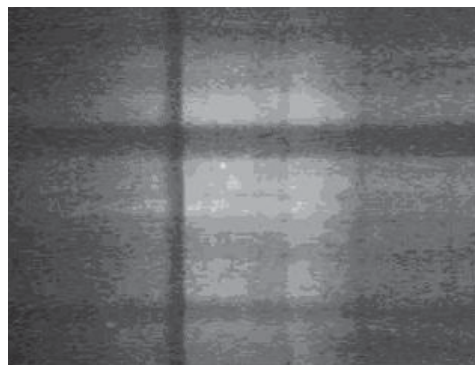


Рис. 4. Исправленное изображение кадра, показанного на рис. 3 (данные летных измерений)

атмосферы — 1, темная полоса 2 характеризует протяженный предмет на поверхности Земли с малым коэффициентом отражения. По оси абсцисс отложены пиксели фотоприемной матрицы, по которым осуществляется развертка спектра по длине волны, а по оси ординат — пиксели, номер которых пропорционален координате x . Поэтому наиболее сильные линии поглощения атмосферы получаются на фотоприемной матрице (см. рис. 3) в виде хорошо проявляющихся вертикальных полос, а любой протяженный предмет на рис. 3 будет изображен в виде горизонтальной полосы, так как он характеризуется определенной координатой x и всем набором длин волн спектра отражения солнечного излучения. Из рисунка видно, что изображение получается искаженным (например, линии 1 поглощения атмосферы должны быть перпендикулярны, а полосы 2 — параллельны основанию). Это происходит из-за погрешностей оптической системы прибора. Этот недостаток исправляется в ходе последующей обработки видеосъемки путем введения некоторых базовых точек, а также их соответствий в неискаженной картинке (промежуточные точки получают интерполяцией координат базовых точек). Базовые точки определяются по положению линий поглощения и по горизонтальным линиям, возникающим при пролете над контрастными предметами на поверхности Земли. На рис. 4 приведен пример исправленного изображения.

Вследствие того, что в процессе приема и обработки излучения вносятся различные искажения, которые нельзя математически промоделировать, требуется определить реальные характеристики гиперспектрометра и, в первую очередь, его спектральное и пространственное разрешения, необходимые для корректного применения прибора, расшифровки полученных снимков и для применения в разработках новых приборов аналогичной конструкции.

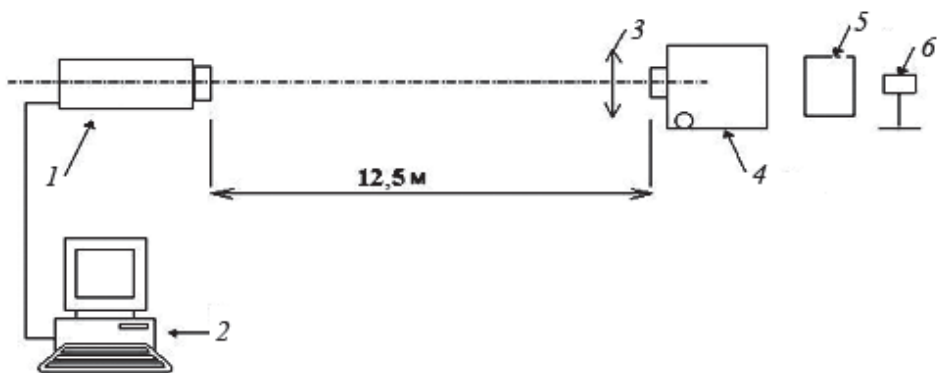


Рис. 5. Экспериментальная установка по определению спектрального и пространственного разрешений гиперспектрометра:

1 — гиперспектрометр, 2 — ЭВМ типа IBM PC, 3 — коллимирующая линза, 4 — монохроматор МДР-41, 5 — конденсор, 6 — лампа

Лабораторные испытания гиперспектрометра, критерии спектрального и пространственного разрешений. Для лабораторного исследования гиперспектрометра была собрана установка, показанная на рис. 5 [7]. Монохроматор формирует на входе гиперспектрометра световой поток в очень узком диапазоне длин волн ($\ll 1$ нм).

Разрешение приборов (как спектральное, так и пространственное) зачастую трактуется неоднозначно, и поэтому требуется выяснить, что в каждом конкретном случае имеется в виду.

Для оценки разрешающей способности гиперспектрометра можно использовать в качестве критерия размер элемента фотоприемной матрицы. При идеальной оптической схеме и идеальной дифракционной решетке именно этот размер будет определять и спектральное и пространственное разрешение. Однако в реальном случае оптическая схема и дифракционная решетка вносят свои искажения, и поэтому следует экспериментально определять спектральное и пространственное разрешение. Более подробные сведения о критериях оценки качества разрешения оптических приборов можно найти в работе [8].

В спектральном анализе под спектральной разрешающей способностью (СРС) понимается теоретический предел, определяющий разность длин волн между двумя монохроматическими линиями одинаковой интенсивности, которые еще могут наблюдаться раздельно. Для нахождения этого предела были использованы оценка СРС как реакция прибора на излучение точечного источника монохроматического излучения и общепринятый критерий Рэлея.

При использовании реакции прибора на излучение точечного источника монохроматического излучения СРС можно определять в терминах функции распределения интенсивности получаемого конечного

изображения этого точечного монохроматического источника излучения по оси λ . В частности, это может быть линейный размер сечения этого распределения, выделенный на определенном уровне (высоте). Такая ширина сечения может быть отнесена не только к спектральной координате λ , но и к пространственной координате x . Как правило, это сечение может быть описано функцией Гаусса

$$J = J_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2}, \quad (1)$$

где J , A и J_0 — интенсивность, амплитуда сигнала и фоновая интенсивность; $x - \lambda$ или x координата, x_c — положение максимума функции; w — среднеквадратическое отклонение.

Ширина сечения обычно измеряется либо на уровне 50 % высоты измеряемого распределения (критерий 50 %-ного уровня) и называется шириной на половине высоты, сокращенно ШПВ, либо на каком-либо выбранном другом уровне (в качестве таких уровней обычно используются значения 5, 10 или 90 %)

В настоящей работе также использован критерий Рэлея, и показано, что как СРС, так и пространственное разрешение гиперспектрометра, определяемые как ШПВ и по критерию Рэлея, довольно близки друг другу.

Результаты измерений. Исследуемыми характеристиками прибора были: спектральный диапазон, поле зрения, спектральное и пространственное разрешение. В экспериментах использовалась установка, показанная на рис. 5. Оказалось, что модуль охватывает область длин волн 620...860 нм. Этот диапазон достаточно близок к заявленному проектировщиками диапазону в 660...860 нм.

Для определения размера поля зрения прибора потребовалось прокалибровать условные пиксели; было произведено измерение двух одновременно светящихся точек, находящихся друг от друга на известном расстоянии по координате x (отметим, что в результате обработки изображение получается по осям X и λ в условных математических пикселях). Таким образом, было получено значение для размера математического пикселя по оси X (оказалось, что на один пиксель приходится 11 мм). Размер условного пикселя по оси λ будет установлен далее. Число пикселей по оси X равно 200, поэтому общее расстояние по оси X , охватываемое модулем, равно 2,2 м. Отсюда, исходя из 12,5 м — расстояния до светящихся точек, получаем угол зрения для оси X , равный примерно 0,18 рад, что достаточно близко к заявленному проектировщиками — 0,2 рад.

Для определения другого угла мгновенного поля зрения, который согласно расчетам равен $1'$, были проведены следующие измерения.

Размер области Δy (см. рис. 2) на расстоянии 12,5 м согласно расчетам должен быть порядка 3 мм, поэтому для нахождения величины Δy было предпринято измерение изображения узкой щели монохроматора, расположенной вдоль оси X , в зависимости от ее ширины (длина волны 702 нм). Основная идея этих измерений состояла в том, что если размеры щели будут больше или равны мгновенному углу зрения, то интенсивность измеренного сигнала не будет зависеть от размера щели.

Экспериментально показано, что для ширины щели больше 3 мм интенсивность сигнала практически не зависит от ширины щели. Таким образом, можно считать, что ширина полосы Δy , охватываемой гиперспектрометром с расстояния 12,5 м, лежит в диапазоне от 3 до 4 мм, а угол зрения приблизительно равен $1'$. Таким образом, и этот угол совпадает с заявленной проектировщиками величиной. Это свидетельствует о том, что использованные при проектировании идеи правильны и расчеты, используемые проектировщиками, могут с успехом применяться для расчета новых вариантов гиперспектрометра.

Обсудим теперь определение спектрального и пространственного разрешений исследуемого модуля. Вначале рассмотрим спектральное разрешение. Сечение трехмерной функции рассеяния точечного квази-монохроматического источника по координате λ (λ -сечение функции распределения изображения от точечного монохроматического источника) для определенного значения x , на котором расположена светящаяся точка, показано на рис. 6 сплошной линией. Напомним, что в данном случае светящаяся точка представляет собой монохроматическое излучение с длиной волны 720 нм и разбросом длин волн много меньше 1 нм. Экспериментально полученное λ -сечение намного шире по спектру, чем исходный источник. “Размытие” спектральной линии происходит на уровне фотоприемной матрицы и связано с оптическими aberrациями и рассеянием на дифракционной решетке.

На рис. 6 λ -сечение функции распределения изображения точечного монохроматического источника показано как в зависимости от номера пикселя (нижняя ось абсцисс), так и от длины волны в нм (верхняя ось абсцисс). С помощью монохроматора была произведена абсолютная калибровка оси абсцисс, при этом каждому пикселю по этой оси было приписано определенное значение длины волны в нм. Штриховой линией показана аппроксимация измеренного распределения функцией Гаусса в виде соотношения (1). Видно, что экспериментально найденное λ -сечение измеренного распределения хорошо описывается функцией Гаусса, параметры которой приведены в табл. 1 в единицах математических пикселей и соответствующих им

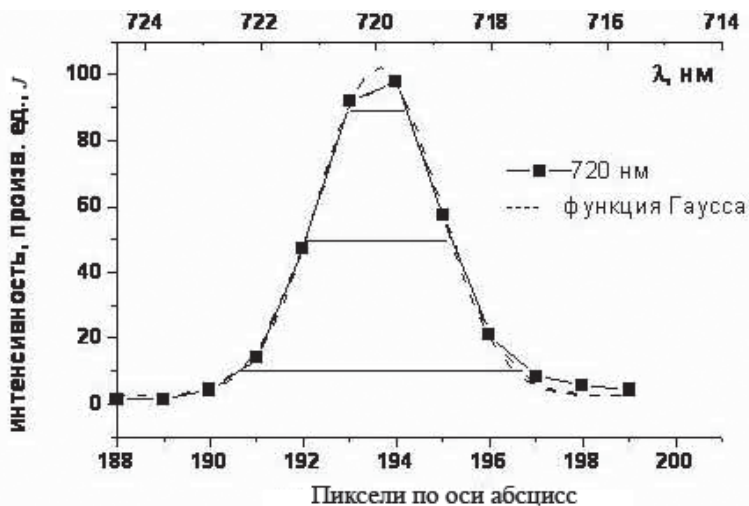


Рис. 6. λ -сечение функции распределения для длины волны 720 нм

длин волн в нм. Дробные значения пикселей появились чисто математически, так как для удобства мы считаем измеряемую функцию распределения непрерывной.

Таблица 1

Параметры функции Гаусса (1), аппроксимирующей λ -сечение (рис. 6)

Значения параметров	A	w	J_0	x_c
В пикселях	320,74	2,566	2,45	193,61
В длинах волн (нм)	232,85	1,86	2,45	720

В табл. 2 приведены ширины λ -сечений (см. рис. 6) для значений интенсивности $J = 10, 50$ и 90% (эти уровни показаны сплошными горизонтальными линиями) в пикселях и нм.

Таблица 2

Ширина λ -сечения для различных уровней интенсивности (рис. 6)

Значение уровня	10 %	50 %	90 %
В пикселях	6,1	3,1	1,2
Длины волн, нм	4,6	2,3	0,9

Приведенные характеристики достаточно полно описывают λ -сечение функции распределения изображения точечного монохроматического источника исследованного модуля.

Экспериментально было проверено, зависит ли ширина этого распределения от ширины щели монохроматора. Оказалось, что до некоторой ширины щели спектральная функция не зависит от ширины

щели. Начиная с ширины щели больше 1,2 мм, наблюдается уширение спектрального распределения, но это уже скорее связано с тем, что при таких широких щелях излучение монохроматора перестает быть монохроматичным.

Приведенные характеристики достаточно полно описывают спектральное разрешение исследованного модуля. Однако, как уже упоминалось ранее, в качестве характеристики разрешающей способности часто используется критерий Рэля, и было интересно сравнить найденные нами значения спектрального и пространственного разрешений с теми, что дает критерий Рэля. Согласно критерию Рэля при провале в распределении интенсивности в изображении двух близких точек в 20% точки будут восприниматься как отдельные. Для этого необходимо, чтобы центральный максимум в изображении одной точки приходился бы на первый минимум в изображении другой.

Для оценки спектрального разрешения прибора по критерию Рэля были зарегистрированы две спектральные линии с $\lambda = 720$ и 723 нм. Получившиеся графики зависимости интенсивности пикселя от номера этого пикселя по оси абсцисс представлены на рис. 7. В рассматриваемом случае на рис. 7 величина провала несколько больше, чем 20%, поэтому можно констатировать, что спектральное разрешение для данной длины волны в данном месте фотоприемной матрицы лучше, чем 3 нм (математическое моделирование, аналогичное показанному на рис. 8, дало значение 2,6 нм). Это значение близко к полной ширине спектрального распределения на половине максимальной высоты (ШПВ — это ширина распределения на уровне $J = 50\%$, которое равно 2,3 нм), и поэтому очень часто в качестве оценки разрешающей способности берется величина ШПВ.

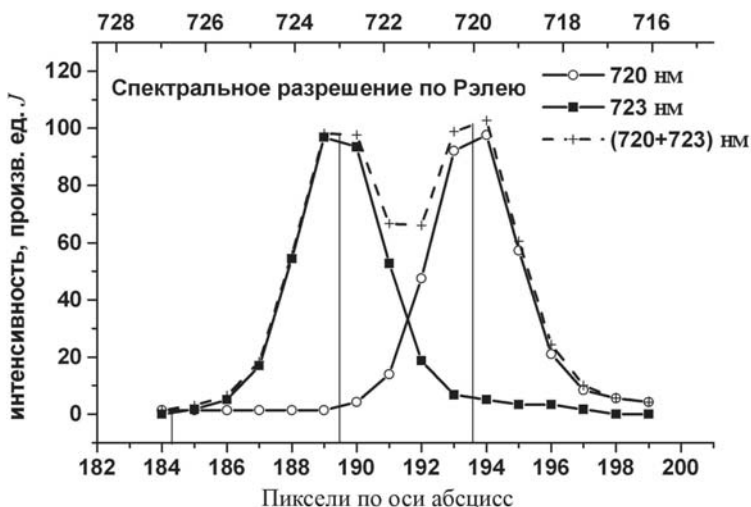


Рис. 7. Определение спектрального разрешения по Рэлю

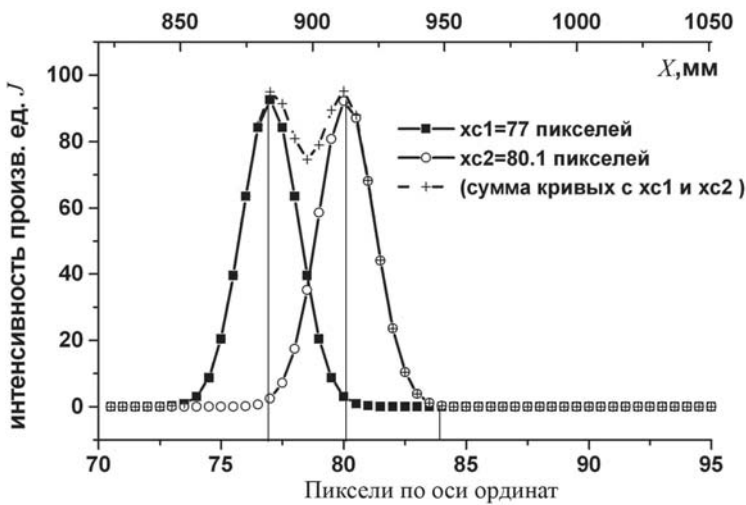


Рис. 8. Определение пространственного разрешения по Рэлею

Было проведено изучение СРС для трех длин волн 640, 735 и 810 нм в трех точках изображения узкой полоски, показанной на рис. 2. Полученные λ -сечения для трех значений длин волн и в трех точках полоски изображения показали довольно хорошее совпадение.

Для исследования пространственного разрешения гиперспектрометра по координате x на расстоянии 12,5 м от модуля гиперспектрометра перпендикулярно оси X размещалась узкая щель. На рис. 9 сплошной линией показано измеренное сечение функции распределения интенсивности изображения от точечного монохроматического источника по оси ординат (X -сечение).



Рис. 9. X -сечение функции распределения интенсивности изображения от точечного монохроматического источника — сплошная кривая; штриховая — аппроксимация функцией Гаусса

Заметим, что пространственное сечение (см. рис. 8) зависит от расстояния до узкой полоски изучаемой поверхности (см. рис. 2) и, в принципе, удобнее говорить об угловой разрешающей способности, не зависящей от расстояния до полоски. Как видно из рис. 8, X -сечение хорошо описывается функцией Гаусса (1), параметры которой приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры функции Гаусса (1), описывающей X -сечение (рис. 8)

Значения параметров	A	w	J_0	x_c
В пикселях	301,73	2,50	3,78	76,1
В единицах длины (мм)	3341,6	27,7	3,78	842,6

Для наглядной оценки X -сечения приведена табл. 4, в которой указаны ширины X -сечения (см. рис. 9) для значений интенсивности $J = 10, 50$ и 90% (эти уровни показаны на рисунке сплошными горизонтальными линиями) в пикселях и мм.

Таблица 4

Ширина X -сечения для различных уровней интенсивности (рис. 8)

Значение уровня	10 %	50 %	90 %
Ширина в пикселях	0,84	2,53	3,93
Ширина в мм	9,3	28	43,5

Для оценки пространственного разрешения прибора по критерию Рэля, аналогично случаю спектрального разрешения, необходимо было разместить два отверстия достаточно близко друг к другу. Сделать это оказалось затруднительно. Поэтому было решено заменить этот эксперимент математическим моделированием с помощью функций Гаусса, описывающих X -сечения и расположенных на разных расстояниях x_c друг от друга.

Расстояние между функциями Гаусса подбиралось так, чтобы удовлетворить критерию Рэля (т.е. величина провала примерно равна 20%). Графики функций Гаусса от номера пикселя (нижняя ось абсцисс) и расстояния по оси X , мм, (верхняя ось абсцисс) для найденных значений положения максимума функций Гаусса x_c представлены на рис. 8. Там же приведен график суммы двух смещенных кривых Гаусса (кресты). Таким образом, было найдено пространственное разрешение, равное 3,1 пикселя или же 34,3 мм. Полученное значение разрешения по Рэлю также довольно близко к ШПВ, которое равно 28 мм.

Также, как и в случае спектрального разрешения, было проведено изучение пространственного разрешения для трех длин волн 640, 735 и 810 нм в трех точках изображения (в трех точках узкой полосы, показанной на рис. 2).

Вместо пространственного разрешения, как уже говорилось выше, имеет смысл говорить об угловой разрешающей способности, равной отношению пространственного разрешения (измеренной, как было отмечено ранее, в плоскости зондируемой поверхности) к расстоянию до этой поверхности L , равному 12500 мм. В качестве пространственного разрешения можно использовать ШПВ = 28 мм, тогда угловая разрешающая способность равна $2,2 \cdot 10^{-3}$ рад.

Полученные экспериментально значения спектрального и углового разрешений можно сравнить с ранее полученными оценками, а именно 1,7 нм для спектрального разрешения и $1,7 \cdot 10^{-3}$ рад для угловой разрешающей способности. Видно, что полученные экспериментальные значения 2,3 нм и $2,2 \cdot 10^{-3}$ рад достаточно близки к теоретическим оценкам, которые, естественно, не могли учесть всего многообразия влияющих на спектральное и пространственное разрешение факторов.

Выводы. Разработан и изготовлен гиперспектрометр, предназначенный для проведения дистанционного мониторинга Земли. Проведены измерения параметров прибора, его спектрального и пространственного разрешений. Показано, что положенные в основу разработки гиперспектрометра теоретические представления о достижимом спектральном и пространственном разрешениях подтверждены экспериментально и могут быть использованы при разработке новой (в частности, космической) гиперспектральной аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V a n e G., C h r i s p M., E n m a r k H., M a s e n k a S., S o l o m o n J. Airborn visible infrared imaging spectrometer: an advanced tool for Earth sensing (AVRIS), Proceedings 1984 IEEE international geoscience and remote sensing symposium, SP215, 1984, pp. 751–757.
2. Белов А. А., Воронцов Д. В., Дубровицкий Д. Ю. и др. Малый космический аппарат “Астрогон-Вулкан” гиперспектрального дистанционного мониторинга высокого разрешения, препринт ИПМех РАН. – № 726. – 2003. – 32 с.
3. A k i m E. L., B e h r P., B r i e s K. et al. The Fire Infrared-Hyperspectral Monitoring (Russian – Germany Proposals for an International Earth Observation Mission), Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences № 32, Moscow, 2004. – 36 pp.
4. J o h n s o n M., F r e e m a n K., G i l s t r a p R., B e s k R. Networking technologies advanced in Earth sciences. http://www.riacs.edu/navroot/research/docs/TR_04.03.hds.

5. Zhang B., Wang X., Liu J., Zheng L., Tong Q. Hyperspectral image processing and analysis system (HIPAS) and its applications // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000. Vol. 66, № 5, pp. 605–609.
6. 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 ИПМех РАН. – № 702. – 2002. – 35 с.
7. Воронцов Д. В., Орлов А. Г., Калинин А. П., Родионов А. И., Шилов И. Б., Родионов И. Д., Любимов В. Н., Осипов А. Ф., Зубков Б. В., Яковлев Б. А. Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1, препринт ИПМех РАН. – № 704. – 2002. – 36 с.
8. Аксенов В. А., Белов А. А., Дубровицкий Д. Ю., Евланов Е. Н., Зубков Б. В., Ильин А. А., Калинин А. П., Мионов А. В., Модин С. Ф., Орлов А. Г., Регельман Б. П., Родионова И. П., Родионов А. И., Родионов И. Д. Автоматизация измерения пространственного разрешения электронно-оптического преобразователя (измерение частотно-контрастной характеристики), препринт ИКИ РАН. – ПР-2114. – 2006. – 35 с.

Статья поступила в редакцию 6.06.2006

Александр Петрович Калинин родился в 1945 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1968 г. Д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института проблем механики РАН. Автор более 125 научных работ в области детекторов частиц и излучений, технического зрения, физики атомных столкновений.

A.P. Kalinin (b. 1945) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1968. D. Sc. (Phys.-Math.), leading researcher of the RAS Institute for Problems of Mechanics. Author of more than 125 publications in the field of detectors of particles and radiations, technical vision and physics of collisions of atoms.

Андрей Геннадиевич Орлов родился в 1980 г., окончил Московский институт электроники и математики в 2002 г., аспирант Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН. Автор 15 научных работ в области научного приборостроения.

A.G. Orlov (b. 1980) graduated from the Moscow Institute for Electronics and Mathematics in 2002. Post-graduate of the RAS Institute for Chemical Physics n. a. N.N. Semyonov. Author of 15 publications in the field of scientific instrument engineering.

Игорь Дмитриевич Родионов родился в 1951 г. окончил Физико-технический институт в 1973 г. Д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, генеральный директор НТЦ "Реагент". Автор более 140 научных работ в области научного приборостроения, детекторов частиц и излучений, атомной физики.

I.D. Rodionov (b. 1951) graduated from the Moscow Physical and Technical Institute in 1973. D.Sc. (Phys.-Math.), head of laboratory of the RAS Institute for Chemical Physics n.a. N.N. Semyonov, general director of the scientific technical center "NTTs "Reagent". Author of more than 140 publications in the field of scientific instrument engineering, detectors of particles and radiations, atom physics.