

Авиационный гиперспектрометр: архитектура и методика расчета элементов

А.Г. Орлов¹, В.В. Егоров², А.П. Калинин³, И.Д. Родионов⁴

¹ ЗАО Научно-технический центр «Реагент»

² Институт космических исследований РАН

³ Институт проблем механики РАН

⁴ Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

E-mail: aorlov@reagent-rdc.ru

Рассматриваются вопросы построения и расчета авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Излагается методика определения основных характеристик прибора: энергетический расчет, определение чувствительности и спектрального разрешения. Описана конструкция, приводятся результаты лабораторного исследования характеристик. Демонстрируются результаты авиационных съемок.

Введение

Видео гиперспектрометр – прибор, осуществляющий съемку изображения исследуемой поверхности, причем для каждой точки этого изображения можно получить спектр яркости отраженного излучения в заданном диапазоне электромагнитного излучения. Спектр яркости представляется ограниченным набором спектральных каналов с заданными полосами пропускания. Результатом гиперспектральной видеосъемки является гиперкуб – трехмерный массив данных, две из координат которого соответствуют пространственным координатам, а третья - номеру спектрального канала.

Формирование изображения исследуемой поверхности в нашем приборе осуществляется путем сканирования поверхности за счет движения аппарата носителя, рис. 1. Гиперспектрометр в один момент времени регистрирует узкий отрезок поверхности под собой, поперек направления полета. Оптическая схема прибора приведена на рис. 2. Формирование изображения узкого отрезка поверхности производится посредством щели, которая устанавливается на задней фокальной плоскости входного объектива. После коллимирующего объектива изображение в параллельных лучах попадает на призму, где происходит разложение в спектр, и затем проецируется на фотоприемную матрицу. Таким образом, на матрице формируется срез гиперкуба, для определенной пространственной координаты x .

Основные параметры созданного гиперспектрометра приведены в табл. 1.

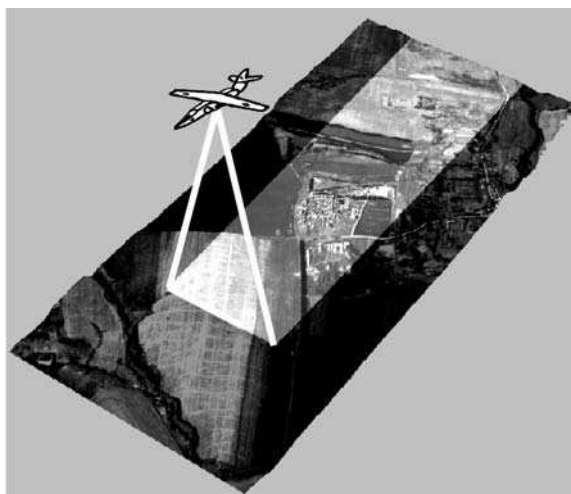


Рис. 1. Сканирование поверхности гиперспектрометром

Таблица 1. Основные параметры гиперспектрометра

Угол зрения поперек трека, град	20	
Число пикселей поперек трека	250	
Спектральный диапазон, мкм	0.45-0.9	
Спектральное разрешение, нм	1.2-11	
Отношение сигнал/шум	100-288	Для средней атмосферы и альbedo поверхности 0.5

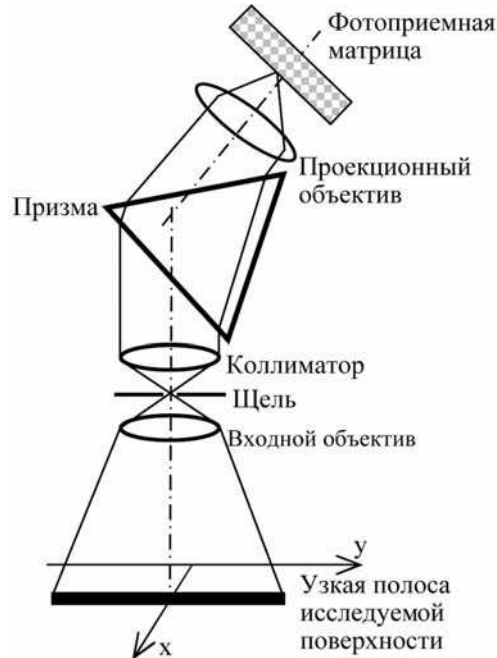


Рис. 2. Оптическая схема гиперспектрометра

Методика расчета основных характеристик

Видео гиперспектрометр предназначен для получения, как изображения, так и спектральных характеристик исследуемой поверхности. Поэтому сочетает в себе параметры типичные как для спектральных приборов (спектральное разрешение), так и для средств регистрации изображений (пространственное разрешение), а также общие для них (чувствительность, отношение сигнал/шум).

Многие параметры гиперспектрометра определяются типом используемого спектроделителя. В описываемом приборе в качестве этого элемента используется стеклянная призма. На рис. 3 приведен ход лучей в призме. В приборе, призма установлена в т.н. минимум отклонения, для этого случая характерно, что угол отклонения лучей ω является минимальным, лучи внутри призмы идут параллельно основанию, и угловое увеличение призмы $\left| \frac{di'_2}{di_1} \right|$ равно единице [3].

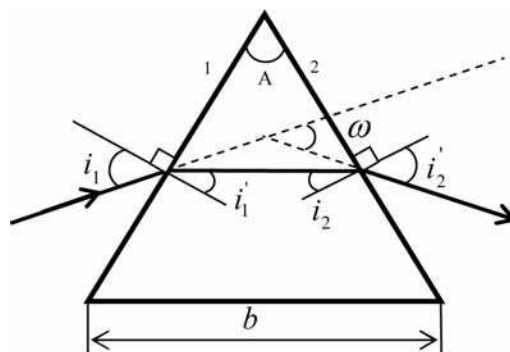


Рис. 3. Ход луча в призме для минимума отклонения

Использование призмы в гиперспектрометре имеет ряд особенностей. Одной из них является специфическая для призмы зависимость освещенности поверхности фотоприемной матрицы от длины волны. Аналитического выражения для этой зависимости ранее в литературе не встречалось. Однако, используя известные соотношения для призмы [3] можно показать, что освещенность поверхности фотоприемной матрицы, в общем случае, будет описываться следующим выражением:

$$I = a \frac{f_K}{f_{II}^2} F(\lambda) \left| \frac{di_2'}{d\lambda} \right|^{-1},$$

где a – ширина щели, f_K, f_{II} – фокусные расстояния коллимирующего и проекционного объектива соответственно, $F(\lambda)$ – освещенность поверхности щели, которая в свою очередь определяется параметрами входного объектива [4]: $F(\lambda) = L(\lambda) \frac{S_B}{f_B^2} \tau_B$, где S_B –

площадь входного зрачка системы, f_B – фокусное расстояние, τ_B – пропускание входного объектива, $L(\lambda)$ – спектральная плотность яркости исследуемой поверхности. С учетом приведенных выше соотношений, а также выражения для $\frac{di_2'}{d\lambda}$ при прохождении лучей в минимуме отклонения [3], получим следующую аналитическую зависимость для освещенности поверхности матрицы:

$$I(\lambda) = L(\lambda) \frac{aS_B f_K \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2}}{2f_B^2 f_{II}^2 \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|} \tau_B \tau_K \tau_{приз} \tau_{II} \quad (1),$$

где A – угол при вершине призмы, n – показатель преломления материала призмы, $\tau_B, \tau_K, \tau_{приз}, \tau_{II}$ – пропускание входного, коллимирующего объектива, призмы и проекционного объектива соответственно. Таким образом, зная спектральную плотность яркости исследуемой поверхности $L(\lambda)$ и параметры системы (фокусные расстояния, ширину щели, пропускание каждого элемента), можно определить освещенность поверхности фотоприемной матрицы для заданной длины волны.

Отметим, что если спектральная плотность яркости поверхности не зависит от длины волны т.е. $L(\lambda) = const$, то освещенность поверхности фотоприемной матрицы зависит от длины волны примерно по кубическому закону. Действительно, согласно формуле Коши зависимость показателя преломления стекла может быть приближенно описана выражением: $n = B - \frac{C}{\lambda^2}$, где B и C –

некоторые постоянные, откуда $\frac{dn}{d\lambda}$, следовательно $L(\lambda) \sim \lambda^3$. Фактически получается, что если длины волн коротковолновой и длинноволновой границы спектрального диапазона относятся как 1:2, то их освещенность будет отличаться в 8 раз. Такая большая разница приводит к сильным различиям в сигнале, который регистрируется в пикселях матрицы, что в свою очередь приводит к большим различиям в отношении сигнал/шум. Однако, этот эффект нивелируется другой особенностью призмы – зависимостью спектрального разрешения от длины волны.

В качестве критерия, по которому определяется спектральное разрешение использовалась полная ширина на полувысоте (ПШПВ) распределения интенсивности на фотоприемной матрице (по спектральной координате), при равномерном освещении щели гиперспектрометра монохроматическим светом. Свойства призмы для разложения оптического излучения в спектр давно используются в монохроматорах, поэтому было целесообразно применить методы расчета спектрального разрешения из теории этих приборов. Согласно [3] спектральное разрешение для используемого спектроделителя описывается следующим выражением:

$$\Delta\lambda = \frac{a}{2f_K} \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2} \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (2)$$

Проанализировав это выражение можно заключить, что спектральное разрешение также как и освещенность поверхности матрицы, зависит от длины волны по кубическому закону $\Delta\lambda \sim \lambda^3$. Эти два факта отчасти могут быть взаимно скомпенсированы. Дело в том, что для коротковолновой части спектрального диапазона, где спектральное разрешение наиболее высоко можно использовать усреднение сигнала по соседним спектральным каналам, тем самым, повысив отношение сигнал/шум за счет снижения спектрального разрешения.

Мы сочли необходимым ввести такой параметр гиперспектрометра как чувствительность. Под чувствительностью понимается отношение фототока пикселей фотоприемной матрицы I_ϕ (e^-/c) к спектральной плотности яркости исследуемой поверхности. Фототок пикселей матрицы связан с освещенностью I через абсолютную чувствительность $S_a(\lambda)$ [2]: $I_\phi = I \cdot S_a(\lambda) / e$, где e – заряд электрона. С учетом соотношения (1) чувствительность гиперспектрометра выражается как:

$$S_{ГС}(\lambda) = \frac{aS_B f_K \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2}}{2f_B^2 f_{II}^2 \left| \frac{dn}{d\lambda} \right| \cdot e} \tau_B \tau_K \tau_{прис} \tau_{II} S_{II} S_a(\lambda) \quad (3)$$

Наличие такой характеристики как чувствительность позволяет легко рассчитывать заряд, который накапливается в пикселях соответствующих спектральных каналов при известной спектральной плотности яркости исследуемой поверхности. Зная заряд пикселей легко определить отношение сигнал/шум, которое будет обеспечиваться при съемке. Для описываемого гиперспектрометра, определение отношения сигнал/шум для типовых условий съемки (средняя атмосфера, альбеда поверхности 0.5) проводилось по методике описанной в [6], согласно проделанным расчетам прибор обеспечивает отношение сигнал/шум в диапазоне от 100:1 до 288:1 в зависимости от номера спектрального канала.

Конструкция

Конструктивно оптическая часть гиперспектрометра и фотоприемная матрица смонтированы на жесткой металлической плите, схема компоновки элементов приведена на рис. 4. Для учета

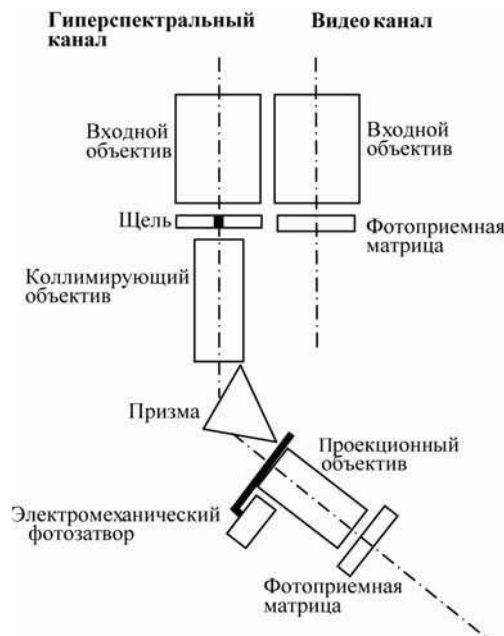


Рис. 4. Схема компоновки элементов гиперспектрометра

темнового тока пикселей фотоприемной матрицы используется электромеханический фотозатвор, который закрывается по команде оператора. Кроме гиперспектрального канала, на плите установ-

лена панхроматическая видеокамера, по результатам съемки которой обеспечивается регистрация эволюций носителя и их последующая компенсация.

Лабораторное исследование основных характеристик

Измерение спектрального разрешения проводилось путем сканирования точечного монохроматического источника, в качестве которого выступал монохроматор МДР-6 и натриевая газоразрядная лампа, которая среди прочих имеет достаточно узкий дублет линий в районе 515 нм. Результаты определения спектрального разрешения по критерию ПШПВ и сравнение их с расчетом, который сделан по формуле (2) представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что экспериментальное разрешение в целом довольно хорошо согласуется с расчетом, но оказывается несколько хуже ожидаемого, что возможно связано с погрешностями сборки и юстировки прибора.

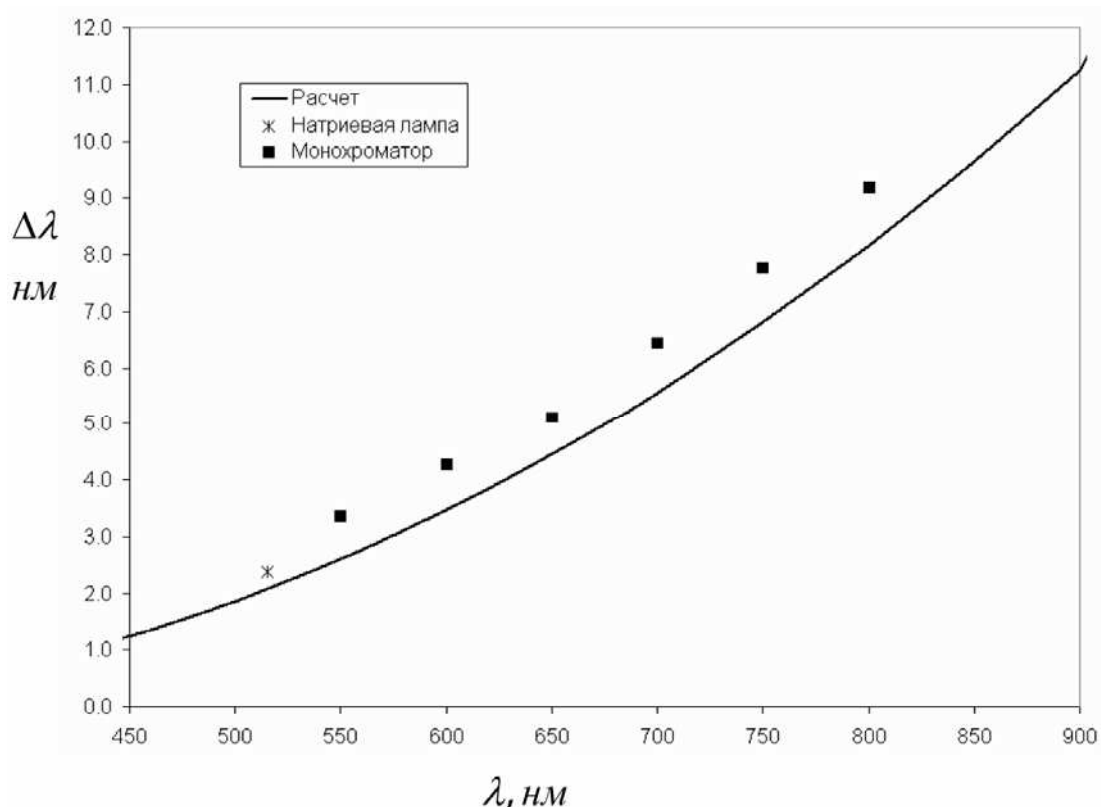


Рис. 5. Экспериментально измеренное спектральное разрешение в сравнении с расчетным

Измерение чувствительности и радиометрическая калибровка гиперспектрометра проводилась с использованием источника диффузного излучения в виде интегрирующей сферы. Внутри сферы была установлена галогенная лампа с цветовой температурой 3200К, для сферы была определена зависимость спектральной плотности яркости выходного отверстия от длины волны $L(\lambda)$

$\left(\frac{Вт}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}} \right)$. Была проведена съемка отверстия интегрирующей с помощью гиперспектрометра,

по формуле (3) определена его чувствительность. Сравнение экспериментально измеренной и расчетной чувствительности прибора приведено на рис. 6. Из рисунка видно, что расчетная чувствительность довольно близка к измеренной.

По результатам экспериментальных исследований можно сказать, что измеренные характеристики прибора, в целом, довольно близки к расчетным.

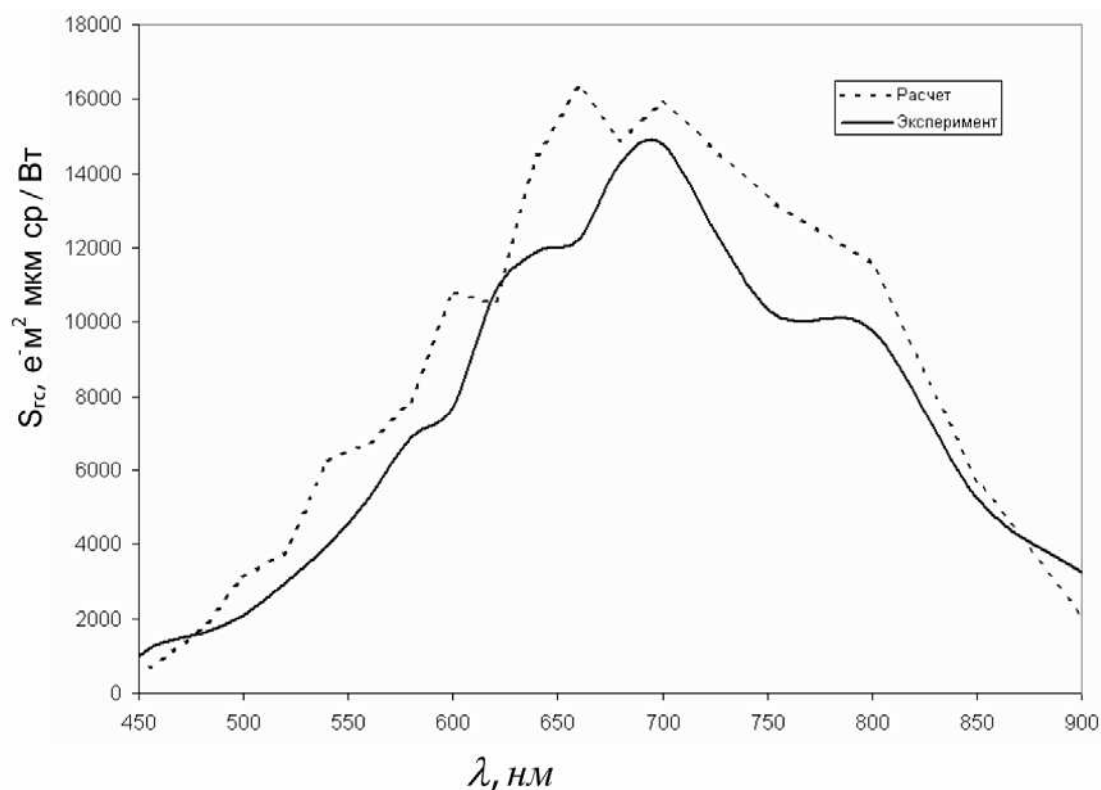


Рис. 6. Экспериментально измеренная и расчетная чувствительность гиперспектрального детектора

Авиационные измерения

С описанным гиперспектральным детектором, было проведено несколько полетов на вертолете МИ-8МТВ и самолете АН-2. Полеты были проведены по заказу ФГУП Гос. центр “Природа” летом 2006, 2007 года, целью исследований было определение возможностей гиперспектральной съемки для детектирования различных видов растительности [5].

При полете по трассе летательного аппарата область обзора гиперспектрального детектора перемещается по зондируемому участку поверхности сложным образом, что связано с изменением углов тангажа, рысканья и крена авиационного носителя, а также с неравномерностью его полета по скорости и высоте. Это приводит к существенным геометрическим искажениям получаемого гиперспектрального изображения. В настоящей работе гиперкуб исправляется от эволюций носителя с использованием материалов синхронной видеосъемки, что является более дешевой (но не менее эффективной) альтернативой использованию гиростабилизированной платформы. Для этих целей в приборе установлена цифровая видеокамера, оптическая ось которой параллельна оптической оси входного объектива гиперспектрального детектора. Электрический фотозатвор видеокамеры работает синхронно с электрическим фотозатвором фотоприемной матрицы в гиперспектральном канале таким образом, что обеспечивается совпадение начала времени интегрирования в канале видеокамеры и в гиперспектральном канале.

Алгоритм, используемый при исправлении, основан на предположении о том, что угол отклонения оптической оси гиперспектрального детектора от вертикали невелик. В этом случае можно считать, что при вращательном движении летательного аппарата область обзора гиперспектрального детектора не меняет своей формы, а только перемещается по зондируемой поверхности. Анализ последовательности кадров, получаемых видеокамерой, позволяет построить траекторию движения области обзора гиперспектрального детектора и видеокамеры по земной поверхности. При построении траектории летательного аппарата проводится сопоставление каждых двух соседних кадров видеокамеры. Вычислялся сдвиг и поворот в плоскости, параллельной зондируемой

поверхности, каждого последующего кадра относительно предыдущего. После этого вычисляется положение и ориентация кадра относительно заданной системы координат. Последовательность положений кадров (их центров) и является искомой траекторией движения области обзора видеокамеры.

После того как смещения и повороты каждого кадра относительно предыдущего вычислены, можно, последовательно накладывая эти кадры на одно изображение с учетом их перемещения, построить так называемую карту зондируемой поверхности, полученную съемкой видеокамеры.

Поскольку положение щели гиперспектрометра относительно изображения видеокамеры определено, то и на полученной карте известно положение щели гиперспектрометра в каждый момент времени. По определяемой траектории перемещения полосы обзора производится геометрическая коррекция гиперспектральных данных.

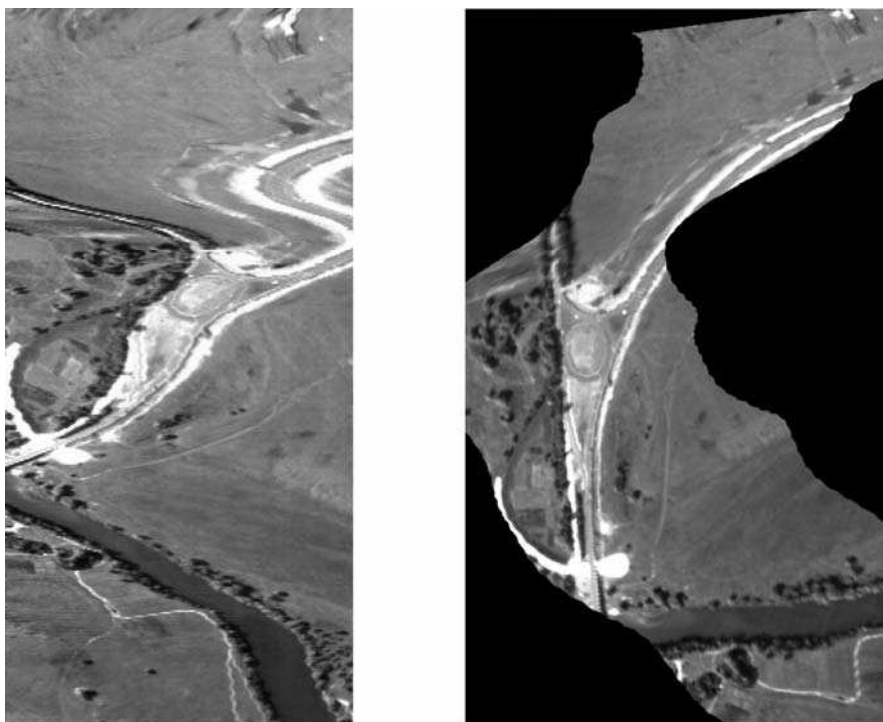


Рис. 7. Неисправленное (слева) и исправленное (справа) на геометрические искажения изображение участка трассы вертолета при выполнении виража

Надо отметить, что рассматриваемый здесь метод учета эволюций носителя достаточно устойчив и эффективен даже тогда, когда носитель выполняет маневры и виражи, т.е. когда курс и крен особенно нестабильны. В качестве подтверждения вышесказанного на рис. 7 приводится, не исправленное и исправленное на геометрические искажения синтезированное из гиперспектральной съемки изображение участка трассы, где вертолет выполняет разворот. По рисунку видно, что при некотором ухудшении разрешения (что вполне естественно при увеличении скорости сканирования щелевым полем зрения гиперспектрометра при выполнении маневра) предлагаемый здесь метод геометрической коррекции изображения дает вполне удовлетворительный результат.

На рис. 8 приведены результаты гиперспектральной съемки участка поверхности Земли с почвенно-растительным покровом и различными сельскохозяйственными культурами. На рис. 8а приведено исправленное на геометрические искажения, изображение для спектрального канала 670 нм. Над полученными данными проведена обработка стандартными для гиперспектральных данных методами, на рис. 8 б показано распределение вегетационного индекса NDVI в градациях серого, индекс отражает плотность биомассы. На рис. 8 в приведены результаты автоматической кластеризации гиперспектральных данных на 5 кластеров методом ISOData.

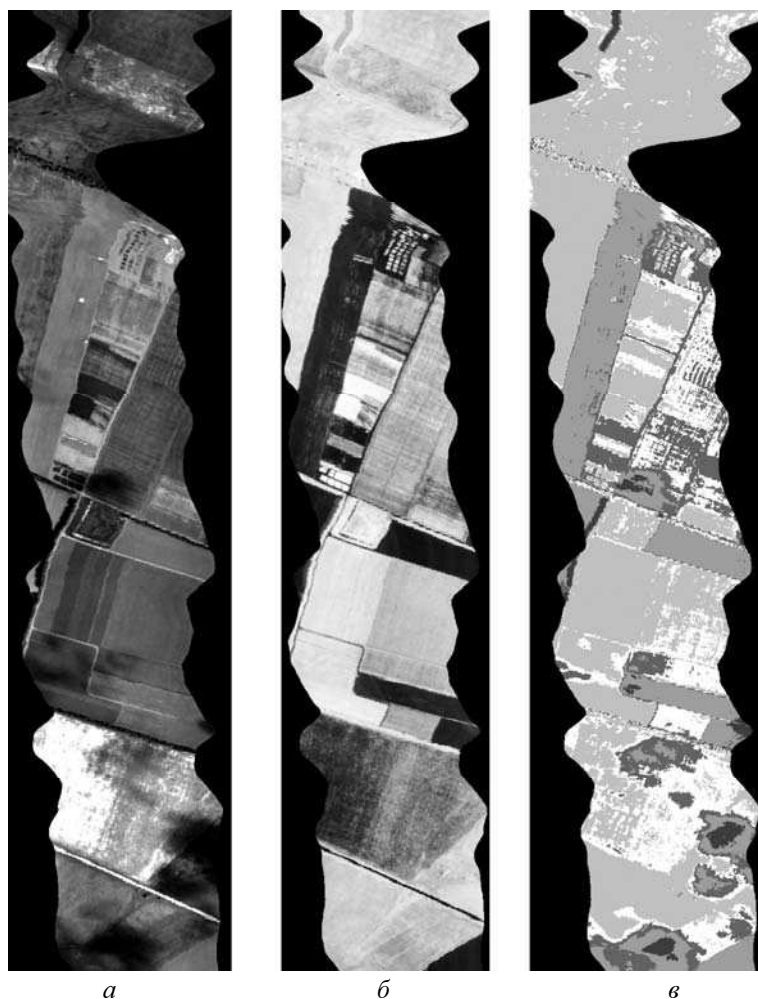


Рис. 8. Изображение для спектрального канала 670 нм – а. Распределение вегетационного индекса NDVI в градациях серого – б. Автоматическая кластеризация данных методом ISODATA (5 кластеров) – в

Заключение

Проведенные полеты показывают, что прибор работоспособен и его данные могут использоваться для решения широкого круга задач, связанных как с детектированием компонентного состава исследуемой поверхности, так и с определением количественных характеристик исследуемых объектов (например, объема биомассы по вегетационным индексам). Авторы выражают благодарность гос. центру “Природа” за предоставленные авиационные носители и организацию полетов.

Литература

1. 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. 99. №8. С. 33-35.
2. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польшиков Г.В. Источники и приемники излучения. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
3. Топорец А.С. Монохроматоры. М.: Гостехиздат, 1955. 156 с.
4. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973. 488 с.
5. Балтер Б.М., Егоров В.В., Калинин А.П., Ильин А.А., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионова И.П., Родионов И.Д. Оценка возможностей гиперспектральной съемки для дистанционного обнаружения заданного типа растительности, Москва, ИКИ РАН Препринт 2134. 2007. 28 с.
6. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Котцов В.А., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В. Методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса, 2007. №5. С. 21-29.