

Многоракурсный гиперспектрометр для аэрокосмического дистанционного зондирования Земли

А.Н. Виноградов¹, В.В. Егоров², А.П. Калинин³, Е.М. Мельникова⁴,
А.И. Родионов⁴, И.Д. Родионов⁵, Е.Я. Сысоева³

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

E-mail: alexey@magn.ru

² *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

E-mail: victor_egorov@mail.ru

³ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

E-mail: kalinin@ipmnet.ru

⁴ *ЗАО Научно-технический центр «Реагент», Москва, Россия*

E-mail: arodionov@reagent-rdc.ru

⁵ *Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия*

E-mail: irodionov@reagent-rdc.ru

Описан многоракурсный гиперспектрометр типа push-broom, представляющий собой принципиально новое устройство дистанционного зондирования Земли, позволяющее получать изображения одновременно в нескольких углах визирования. Это дает возможность определять угловую развертку изображений земной поверхности, что способствует повышению достоверности классификации и оценки состояния зондируемых объектов. Многоракурсность дистанционного зондирования обеспечивается особенностью конструкции диафрагменного узла, предполагающего наличие нескольких щелей. Конструкторские и расчетные решения гиперспектрометра посредством изготовления функционального макета и проведения стендовых испытаний.

Ключевые слова: гиперспектрометр, многощелевой, дистанционное зондирование, диафрагменный узел, призма, матрица.

Введение

Наиболее часто для аэрокосмического дистанционного зондирования Земли применяют гиперспектрометр (в английской терминологии типа push-broom), осуществляющий формирование гиперспектрального изображения вдоль трассы полета узкой полосой области обзора, создаваемой одной узкой щелью диафрагменного узла, благодаря поступательному движению носителя. При этом плоскость обзора зондируемой поверхности ориентирована, как правило, перпендикулярно траектории носителя гиперспектрометра.

В то же время проведение гиперспектральной съемки исследуемой поверхности одновременно под несколькими ракурсами способствовало бы увеличению информативности получаемых данных за счет получения сведений об угловых особенностях восходящего от зондируемых объектов излучения. В литературе (Menenti et al., 2004) приводятся данные о многоугловых (пять ракурсов) гиперспектральных съемках видеоспектрометром CHRIS, размещенным на поворотной платформе PROBA. Результаты этих съемок использовались для определения ключевых свойств растительности. Однако техническая реализация таких измерений представляется достаточно сложной и дорогостоящей. Альтернативой такого подхода может служить методика съемки, основанная на использовании в гиперспектрометре многощелевого диафрагменного узла (Родионов и др., 2012).

Целью настоящей работы является описание способа многоракурсной гиперспектральной съемки, выполняемой с авиакосмических носителей, и ее технической реализации.

Оптическая схема многоракурсного гиперспектрометра

На *рис. 1* показана оптическая схема многоракурсного гиперспектрометра с диафрагменным узлом с тремя щелями (число щелей может быть и большим).

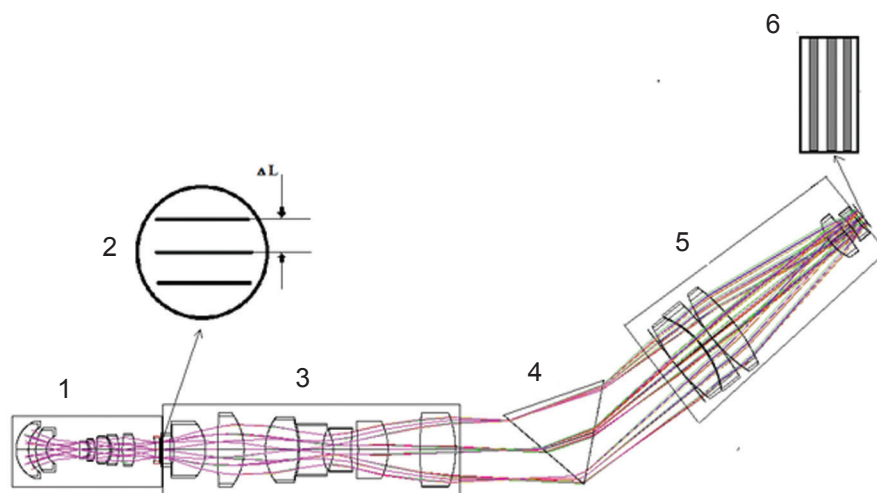


Рис. 1. Ход световых лучей в трехщелевом гиперспектрометре:
 1 – входной объектив; 2 – диафрагменный узел; 3 – коллиматор;
 4 – призма; 5 – проекционный объектив; 6 – фотоприемная матрица

Продemonстрируем функционирование такого многоракурсного гиперспектрометра. Отраженные, рассеянные или излучаемые фотоны от зондируемого объекта попадают во входной объектив 1, который формирует изображение объекта на многощелевом диафрагменном узле 2. Каждая щель выделяет изображение узкого участка объекта, видимого под разными углами, как это показано на *рис. 2*, на котором приведены три положения (*а*, *б* и *в*) гиперспектрометра при пролете носителя прибора над зондируемым объектом.

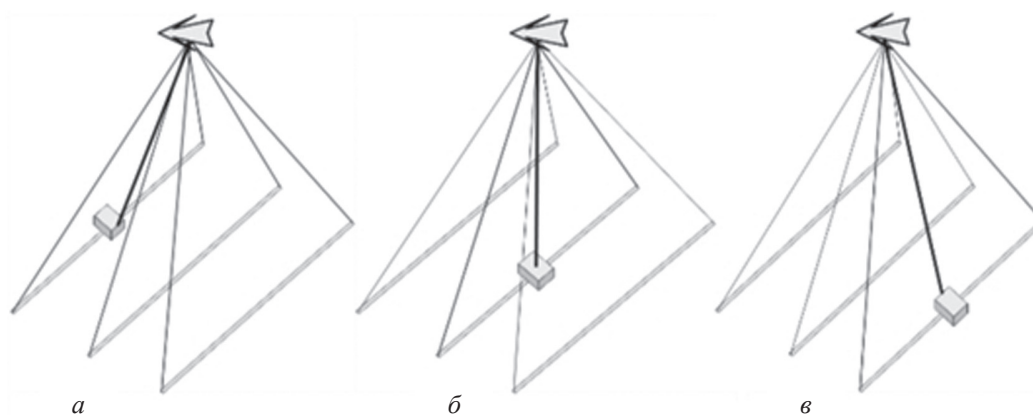


Рис. 2. Пролет многощелевого гиперспектрометра над объектом

Далее эти три изображения проходят через коллиматор 3 попадают на призму 4. После призмы разложенные по спектру изображения через проекционный 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, 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 обзора полосы на поверхности объекта (Земли). Эти углы 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.

Был проведен расчет оптической схемы многоакурсного гиперспектрометра. В качестве исходных данных использовались следующие значения параметров (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные для расчета многоакурсного гиперспектрометра

Спектральный диапазон, нм	450–900
Полное поле зрения 2ω , град.	40
Количество щелей	3
Фоточувствительный элемент	Матрица sCMOS, 2560x2160, размер пиксела 6,5 мкм, $16,6 \times 14$ мм, спектр вдоль длинной стороны. Эффективный пиксел 13×13 мкм.
Спектроделитель	Призма
Угловое разрешение, не более, мрад	1
Коэффициент передачи контраста (*), не менее	0,4
Спектральное разрешение $\lambda/\delta\lambda$, не хуже (для длины волны 600 нм)	300
Геометрическая светосила гиперспектрометра, не менее	$(1/2.8)^2$
Коэффициент пропускания, не менее	0.5

Примечания.

(*) Коэффициент передачи контраста измеряется на частоте Найквиста для размера эффективного пиксела.

Среднеквадратичный диаметр пятна рассеяния не должен превышать размер эффективного пиксела. Изображения щелей не должны перекрываться во всем диапазоне чувствительности матрицы, а именно 300–1000 нм.

Основные оптические характеристики входного объектива определялись из исходных данных для расчета.

1. Угловое поле в пространстве предметов:

$$2\omega = 40^\circ.$$

2. Фокусное расстояние f'_1 :

$$f'_1 = y_2 / \operatorname{tg}(\omega),$$

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

Высоту щели находим из следующего соотношения:

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

где $2y'$ – линейное поле по оси ОУ в пространстве изображений гиперспектрометра, равное высоте матрицы ($2y' = 14$ мм);

f'_3 – фокусное расстояние коллимационного объектива 3;

f'_5 – фокусное расстояние выходного объектива 5.

Приняв соотношение фокусных расстояний $f'_5/f'_3 = 1$, находим требуемое фокусное расстояние входного объектива: $f'_1 \approx 19,23$ мм.

3. Геометрическая светосила входного объектива не менее $(1/2.8)^2$ и равна светосиле гиперспектрометра, так как выбрано соотношение фокусных расстояний коллиматора и выходного объектива $f'_5/f'_3 = 1$.

4. Оценка качества входного объектива и соответствие заданным требованиям пространственного и спектрального разрешения гиперспектрометра проводятся по размеру пятен рассеяния 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 следует уделить 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 осуществляется итерационными способами, т.е. путем последовательных приближений, которые осуществляются решением системы нелинейных уравнений (Заказнов и др., 1992). Решение указанных уравнений направлено на минимизацию оценочной функции:

$$F = \sum_{j=1}^k a_j (\Phi_j - \bar{\Phi}_j)^2,$$

где a_j – весовые коэффициенты; $\bar{\Phi}_j$ – текущие значения корригируемых функций (в частности, aberrаций); Φ_j – заданные значения корригируемых функций. Оптимизация системы проводилась с помощью программы Zemax демпфированным методом наименьших квадратов (DLS).

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, что 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 $2\omega = 40^\circ$. Три щели диафрагменного узла, расположенные в соответствии с *рис. 1* с $\Delta L = 4,61$ мм, дают возможность получать изображение объектов, соответствующих углам обзора полосы $\omega_x = 0^\circ$ и $\omega_x = \pm 14^\circ$ в направлении полета носителя (*рис. 2*).

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

Сформированные коллиматором параллельные пучки лучей попадают на диспергирующий 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 равнобедренная призма из стекла марки BK7 (Schott) со стороной 60 мм.

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 построен по схеме телеобъектива, что при большом фокусном расстоянии ($f'_3 \approx 100$ мм) позволяет несколько сократить его габариты. Изображение проецируется в плоскость приемной матрицы, расположенной на расстоянии 3,6 мм от последней поверхности выходного объектива.

По результатам сквозного расчета была получена оптическая схема гиперспектрометра, представленная на *рис. 1*.

Основные характеристики разработанной оптической системы, полученные в результате расчета:

- угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 40^\circ$;
- геометрическая светосила $(1/2,7)^2$;
- диаметр входного зрачка $D = 7$ мм.

Расположение входных щелей соответствует трем значениям углового поля по оси x : 0° , 14° , -14° . На *рис. 3* показаны координаты лучей для длин волн 450 нм (крестик) и 900 нм (кружок) в плоскости изображения гиперспектрометра (чувствительного слоя приемника излучения) от трех щелей и для угловых полей $\omega_y = 0^\circ$, 14° , -14° . Размеры прямоугольника

соответствуют размерам матрицы ($16,6 \times 14$ мм²), а сетка на этом рисунке определялась программой Zemax. Ширины d_i изображений координат лучей (сплошные линии на *рис. 3*) для спектрального диапазона от 450 до 900 нм для различных щелей получились равными: 2,58 мм (для $\omega_x = 0^\circ$), 2,68 мм (для $\omega_x = 14^\circ$); 2,46 мм (для $\omega_x = -14^\circ$). При ширине щелей 13 мкм данные значения позволяют получить $d_i/13$ соответственно 200, 206 и 190 спектрально независимых каналов.

Оценка спектрального и пространственного разрешения проводилась на центральной длине волны $\lambda = 600$ нм.

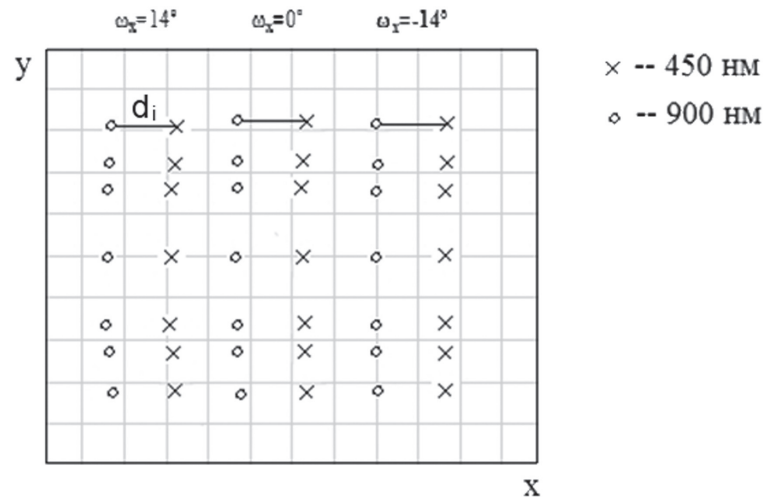


Рис. 3. Изображение координат лучей для длин волн от 450 до 900 нм, полученное в плоскости матрицы от трех щелей

На *рис. 4* приведены диаграммы пятен рассеяния для мгновенного поля зрения прибора по линии, перпендикулярной траектории полета для центральной щели $\omega_x = 0^\circ$, характеризующие пространственное и спектральное разрешение гиперспектрометра.

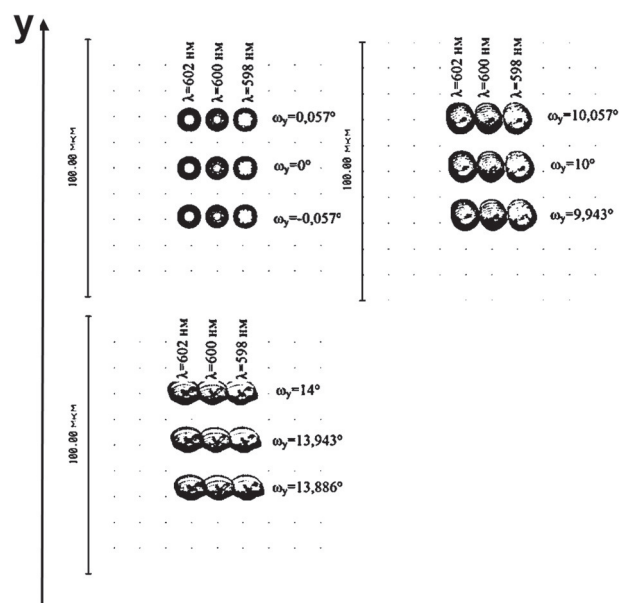


Рис. 4. Диаграммы пятен рассеяния для мгновенного поля зрения прибора для центральной щели $\omega_x = 0^\circ$ и различных значений ω_y

При данном масштабе видно, что даже для крайней точки поля $\omega_x = 0^\circ$, $\omega_y = 14^\circ$ расстояние между центрами пятен по оси y при разности углов между центрами пятен 1 мрад составляет примерно 20 мкм при среднеквадратичном диаметре пятен рассеяния менее 10 мкм. Таким образом, при размере эффективного пиксела матрицы 13 мкм требование по угловому разрешению выполнено.

Требование по спектральному разрешению также выполнено: расстояние между центрами пятен для длин волн, отличающихся на 2 нм больше половины среднеквадратичного диаметра пятна рассеяния.

Макет многоракурсного гиперспектрометра

Разработка нового прибора неизбежно связана с необходимостью проверки предложенного метода многоракурсных измерений. С этой целью было проведено функциональное макетирование прибора. Функциональный макет собирался из серийно выпускаемых комплектующих, простых в изготовлении оптических деталей.

При создании макета гиперспектрального модуля в первую очередь необходима разработка эскиза оптической системы макета. Это связано с тем, что расчетную оптическую систему, описанную выше, в макете воспроизвести невозможно, при макетировании оптической системы был принят другой путь. Суть предложенного пути состоял в том, что виньетирование в оптических системах, которое обычно воспринимается как мешающий фактор, можно использовать с очевидной пользой при разработке гиперспектрального модуля с большим угловым полем. Выбирая входной объектив 1 (рис. 5) с большой светосилой, можно за счет большой апертуры входного пучка света обеспечить попадание части этого пучка на коллиматор 3 при достаточно больших полевых углах.

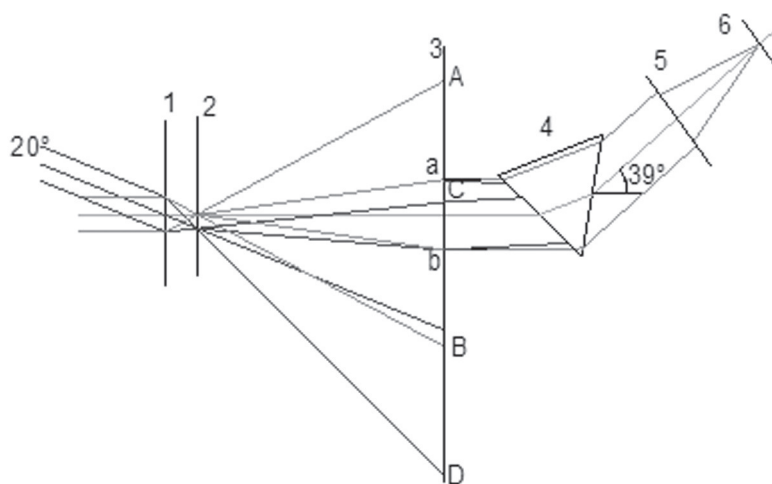


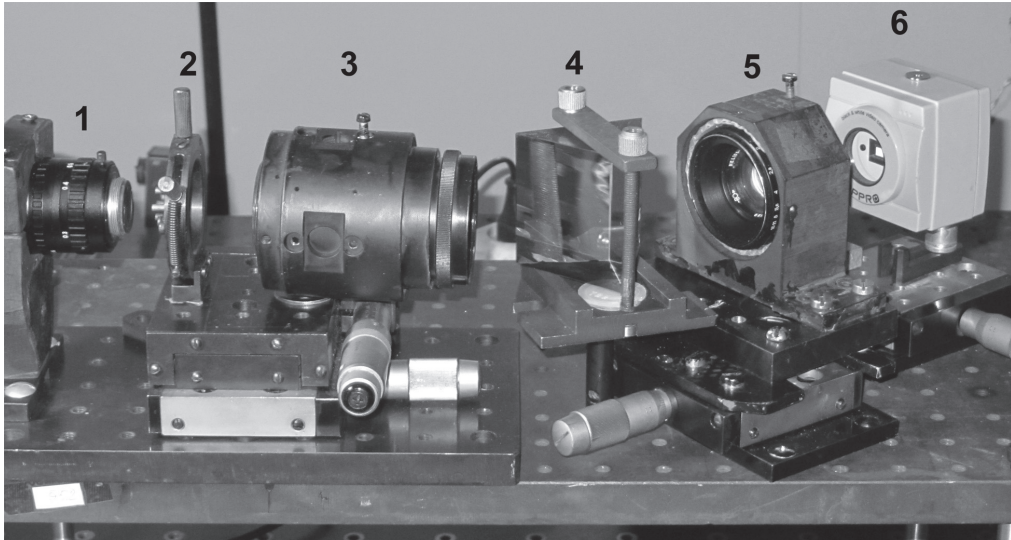
Рис. 5. Ход лучей в оптической системе макета

Хотя центральный входной пучок будет сильно ослаблен (поперечный размер ab вместо AB), но полевой входной пучок при значительном виньетировании (поперечный размер Cb вместо CD) тоже пройдет через коллиматор. Полагаем, что виньетирование по-

рядка 70% будет вполне допустимо для функционирования макета, принимая во внимание, что динамический диапазон видеокамер составляет $\sim 10^4$.

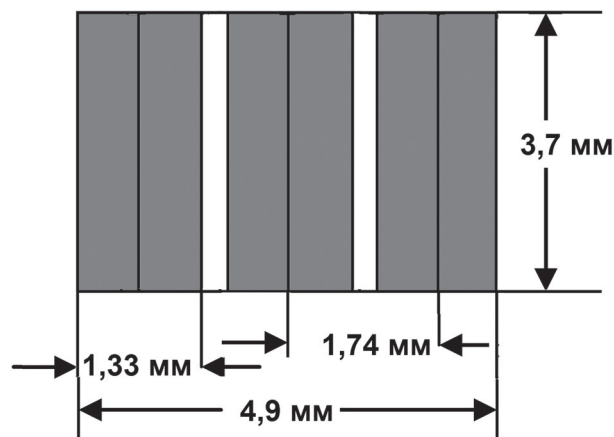
После коллимирующего объектива свет проходит через призму 4 (диспергирующий элемент), выходной объектив 5 и попадает на светочувствительную поверхность приемника 6. Диафрагменный узел 2 подобен узлу, показанному на *рис. 1*.

На *рис. 6* показан лабораторный макет многощелевого гиперспектрометра.



*Рис. 6. Макет многощелевого гиперспектрометра:
1 – входной объектив; 2 – диафрагменный узел; 3 – коллиматор;
4 – призма; 5 – выходной объектив; 6 – видеокамера*

Рассмотрим, как изображения щелей для длин волн 450–900 нм будут проецироваться на матрицу коллимирующим и выходным объективами. Щелевая диафрагма, спроецированная на матрицу этими объективами, представляет собой три изображения щелей с линейным увеличением, равным отношению фокусных расстояний этих объективов $f'_3 = 50$ и $f'_5 = 135$ мм, соответственно. Изображения центров щелей в этом случае будут отстоять друг от друга на расстоянии $\Delta df'_5/f'_3 = 4,7 \cdot 50/135 \approx 1,74$ мм (*рис. 7*).



*Рис. 7. Расчетное изображение спектральных полос 450–900 нм
для трех щелей*

Спектр создается путем разложения света, прошедшего через щель на призме. Материал призмы – стекло ВК7. В приборе призма установлена в положение «наименьшего отклонения». Призма имеет преломляющий угол $\theta = 60^\circ$. Поэтому угол отклонения лучей призмой с разной длиной волны, будет определяться выражением:

$$\varepsilon = (360/\pi) * \arcsin(n * \sin(\theta/2)) - \theta,$$

где ε – угол в градусах, n – показатель преломления материала призмы для конкретной длины волны.

Тогда ширина спектра, создаваемого призмой, будет равна:

$$\Delta\varepsilon = (360/\pi) * (\arcsin(n_1/2) - \arcsin(n_2/2)),$$

где $n_1 \approx 1,52532$ для длины волны 450 нм, соответствующей началу спектрального диапазона прибора; $n_2 \approx 1,50800$ для длины волны 900 нм, соответствующей концу спектрального диапазона прибора.

Применив эту формулу, получим угловой размер спектра, создаваемого призмой, $\Delta\varepsilon = 1,52^\circ$, что соответствует ширине изображения спектра 450–900 нм $\Delta h = \Delta\varepsilon * f'_5 = 1,33$ мм на поверхности матрицы. Таким образом, для использованных объективов и призмы изображения всех трех щелей для диапазона длин волн 450–900 нм укладываются в размеры матрицы.

Был изготовлен стенд с тремя светодиодами, расположенными так, чтобы каждая пара засвечивала только одну из трех щелей макета. Угловое расстояние направлений на крайние светодиоды относительно оптической оси входного объектива макета составляло $15,45^\circ$. Светодиоды с помощью переключений могут загораться синим и красным цветом. Ввиду того, что спектральные диапазоны излучения светодиодов достаточно широкие и границы их невозможно предсказать, было принято решение использовать совместно со светодиодами интерференционные фильтры соответствующих цветов с узкими полосами пропускания. Были выбраны фильтры с полосами ± 10 нм, отсчитываемыми от центральных длин волн (соответственно, 474 нм и 630 нм) на высоте, равной половине максимального значения спектра. С помощью платы захвата сигналы аналоговые сигналы матрицы видеокамеры подавались на систему аналого-цифрового преобразователя, а затем на монитор компьютера. На *рис. 8* показаны полученные при этом результаты. Здесь буквой *с* обозначен сигнал от синего цвета светодиода, а буквой *к* – от красного цвета светодиода при использовании фильтров.

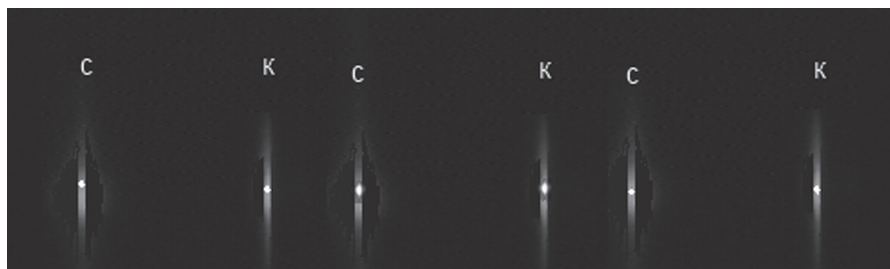


Рис. 8. Изображение, полученное с макета многоракурсного гиперспектрометра при освещении его красными и синими диодами

Таким образом, была продемонстрирована принципиальная возможность получать одновременно три изображения трехщелевым гиперспектрометром в заданном спектральном диапазоне (450–900 нм).

Заключение

Предлагаемый многоракурсный гиперспектрометр типа push-broom представляет собой принципиально новое устройство дистанционного зондирования Земли, не имеющее мировых аналогов, позволяющее получать изображения одновременно в нескольких углах визирования. Это дает возможность определять угловую развертку изображений земной поверхности, что будет способствовать повышению достоверности классификации и оценки состояния зондируемых объектов. Многоракурсность дистанционного зондирования обеспечивается особенностью конструкции диафрагменного узла, предполагающего наличие нескольких щелей. Это потребовало разработку специфической методики расчета оптической схемы гиперспектрометра, который был выполнен программой Zemax. Результаты расчетов подтвердили принципиальную возможность создания такого многоракурсного гиперспектрометра с характеристиками, практически не отличающимися от однощелевого сенсора. Конструкторские и расчетные решения были подтверждены посредством изготовления функционального макета и стендовых испытаний. Наряду с достоинствами традиционных однощелевых гиперспектрометров, многоракурсный сенсор наиболее перспективен для изучения угловых отражательных свойств земной и морской поверхности, анализа ее пространственной структуры (в частности, структуры морской поверхности).

Литература

1. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н.* Теория оптических систем: Учебник для приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
2. *Родионов И.Д., Родионов А.И., Калинин А.П., Егоров В.В.* Многоракурсный гиперспектрометр для дистанционного зондирования земной поверхности. Патент №121366. Опубликовано 20.10.2012. Бюлл. № 29. 10 с.
3. *Massimo M., Maselli F., Chiesi M., Benedetti R., Cristofori S., Guzzi D., Magnani F., Raddi S., Maffei C.* Multi-angular hyperspectral observations of Mediterranean forest with PROBA-CHRIS// Proc. SPIE 5546, Imaging Spectrometry X, 204 (October 15, 2004); doi:10.1117/12.559348.

Multi-angle push-broom hyperspectrometer for Earth remote sensing

A.N. Vinogradov¹, V.V. Egorov², A.P. Kalinin³, E.M. Melnikova⁴,
A.I. Rodionov⁴, I.D. Rodionov⁵, E.Ya. Sysoeva³

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics, Moscow, Russia*

⁴ *REAGENT Scientific Engineering Centre, Moscow, Russia*

⁵ *Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Multi-angle of approach push-broom hyperspectrometer which represents landmark decision for Earth remote sensing is described. Such sensor permits to receive images simultaneously for several viewing angles. It enables to determine image angular reamer which contributes to increasing the classification validity and the status estimation of sense objects. Multi-angle of approach for remote sensing is achieved by the special construction of aperture stop unit which has several slots. Constructive and calculation decisions were confirmed by the experimental model production and bench-top realization.

Keywords: hyperspectrometer, multi-slotted, remote sensing, multi-slotted, diaphragm unit, prism, matrix.