

## Методика определения спектральных характеристик гиперспектральной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования земли

В.И. Заварзин<sup>1</sup>, А.В. Ли<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

<sup>2</sup> НТЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия.

*Предложена методика определения спектральных характеристик, на основе которой разработана программа для расчета дисперсии, спектрального разрешения и кривизны спектральных линий гиперспектральной съемочной аппаратуры.*

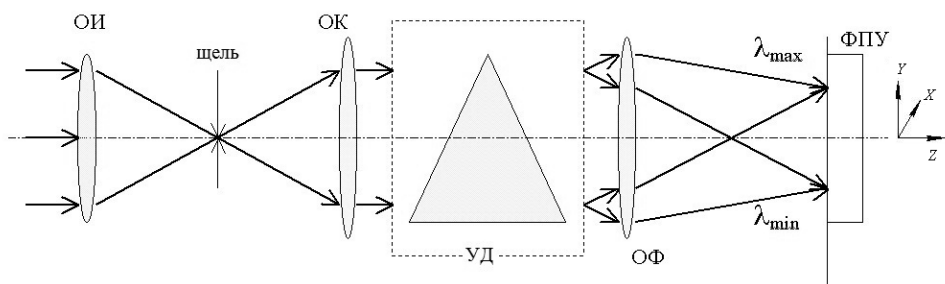
**E-mail: dekan.oep@gmail.com**

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, гиперспектральная аппаратура, спектральное разрешение, дисперсия.

В соответствии с Федеральной космической программой России в настоящее время происходит наращивание космической группировки спутников с оптико-электронной аппаратурой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на борту, в том числе гиперспектральной съемочной аппаратурой (ГСА) [1].

Преимуществом ГСА является возможность одновременного получения изображения объекта во множестве узких спектральных каналов, т. е. его спектральной характеристики. За последнее десятилетие создан целый ряд подобных авиационных и космических приборов.

Большинство известных аппаратов для гиперспектральной съемки построено на основе схемы классического спектрометра с входной щелью, коллимирующим и фокусирующим объективами, призмным диспергирующим устройством и матричным фотоприемным устройством (рис. 1). Объектив изображающий (ОИ) формирует движущееся (по направлению  $OY$ ) изображение подстилающей поверхности на входную щель спектрометра, установленную в фокальной плоскости ОИ. Объектив коллимирующий (ОК) образует параллельный пучок лучей от изображения на щели, который раскладывается в спектр с помо-



**Рис. 1. Схема работы прибора**

щью диспергирующего устройства (ДУ) и проецируется объективом фокусирующим (ОФ) на фотоприемное устройство (ФПУ). Ширина щели по направлению  $OY$  равна размеру элемента приемника изображения, а по направлению  $OX$  определяется требованием к захвату.

**Постановка задачи.** В процессе проектирования ГСА после разработки основных схмотехнических и конструктивных решений аппаратуры необходимо оценить их влияние на формирование изображения и измерительные характеристики аппаратуры. Предполагается оптимизация по критерию влияния на качество формируемого изображения — его оптотехнических параметров, которые определяют пространственно-частотные, геометрические и спектрометрические дешифровочные характеристики.

Важной задачей для такой аппаратуры является расчет спектральных тактико-технических характеристик прибора: угловой и линейной дисперсии, спектрального разрешения.

Для решения этих задач необходимо рассчитать ход полихроматического осевого пучка лучей в меридиональной плоскости спектрометра.

**Решение задачи.** Рассчитаем ход луча света в спектрометре. Расчеты ведутся в правой системе координат (СК)  $OXYZ$  с началом в некоторой точке  $O(0, 0, 0)$  на оптической оси. Ось  $OX$  параллельна входной щели. Ось  $OZ$  совпадает с оптической осью. Ось  $OY$  дополняет СК  $OXYZ$  до правой. Объективы коллимирующий и фокусирующий рассматриваются как бесконечно тонкие, расположенные в однородной среде. Среды разделены плоскостями (поверхностями призм), развернутыми вокруг осей, параллельных оси  $OX$ . Нормали к плоскостям раздела сред направлены в сторону преломленных лучей. Воздушный промежуток вводится (при необходимости) как очередная среда с  $n_i(\lambda) = 1$ , со своей плоскостью раздела, имеющей свою нормаль.

Рассмотрим преломление монохроматического луча света на какой-либо поверхности раздела сред (рис. 2).

Орт нормали к  $i$ -й плоскости раздела —  $\vec{N}_i$ . При развороте плоскости раздела сред на угол  $q_i$  орт нормали будет иметь координаты

$$\vec{N}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin q_i \\ \cos q_i \end{pmatrix},$$

где  $\vec{A}_i$  — орт преломленного  $i$ -й (по ходу луча) плоскостью луча.

Угол между падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред можно вычислить по формуле скалярного произведения ортов  $\vec{A}_{i-1}$  и  $\vec{N}_i$ :

$$\cos \alpha_{i-1} = \frac{\vec{A}_{i-1} \vec{N}_i}{|\vec{A}_{i-1}| |\vec{N}_i|} = A_{i-1}(x)N_i(x) + A_{i-1}(y)N_i(y) + A_{i-1}(z)N_i(z). \quad (1)$$

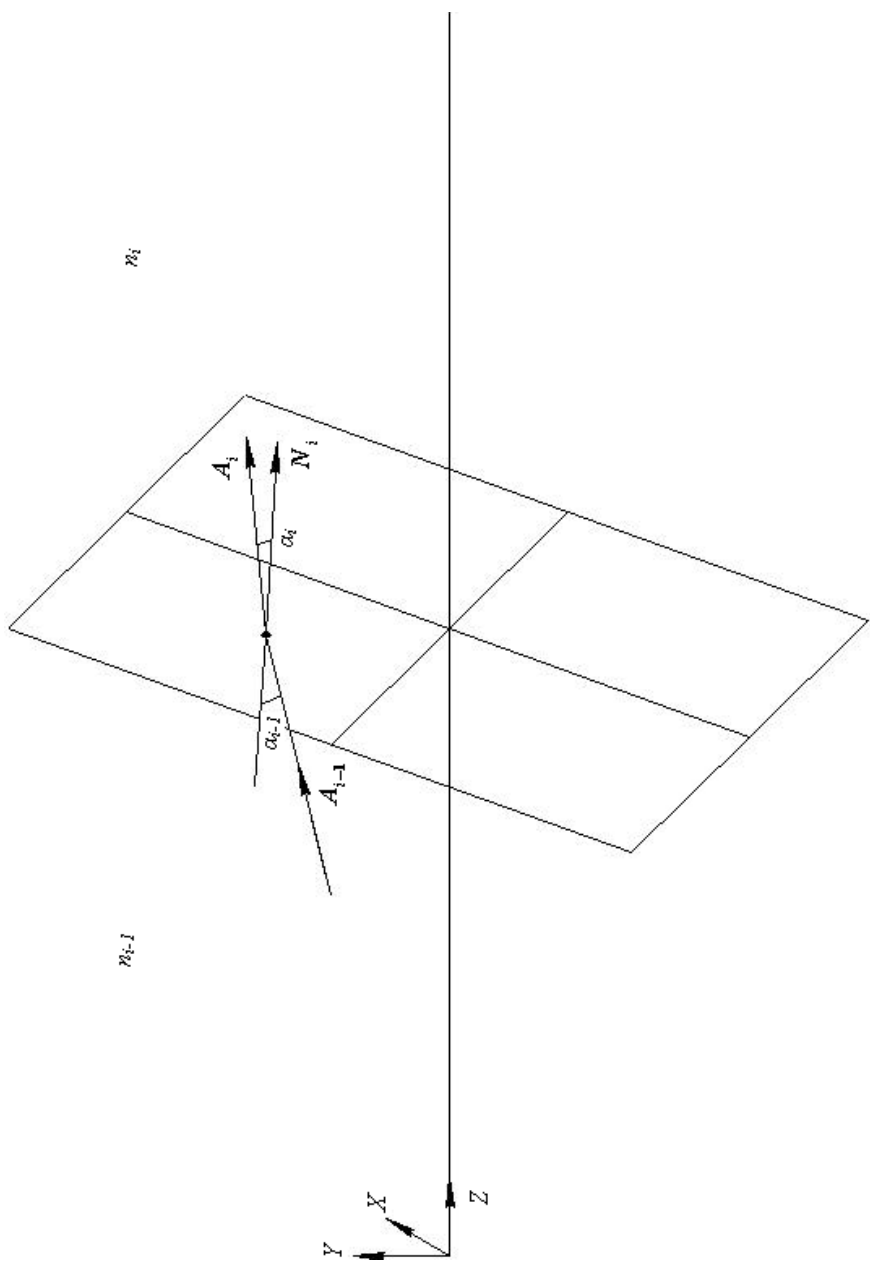


Рис. 2. Преломление луча света на поверхности раздела сред

Согласно закону преломления, известному из геометрической оптики [2], синус угла между преломленным лучом и нормалью рассчитывается по формуле

$$\sin \alpha_i = \frac{n_{i-1}(\lambda)}{n_i(\lambda)} \sin \alpha_{i-1}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{i-1}$  — угол между падающим лучом и нормалью в точке падения;  $\alpha_i$  — угол между преломленным лучом и нормалью в точке падения.

Введем вспомогательную СК, в которой орт нормали имеет координаты:

$$\mathbf{N}_i^N = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица направляющих косинусов перехода от основной к вспомогательной СК при развороте плоскости раздела сред на угол  $q_i$  имеет следующий вид [3]:

$$M_{0 \rightarrow N}(q_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_i & \sin q_i \\ 0 & -\sin q_i & \cos q_i \end{pmatrix}.$$

Соответственно орт падающего луча имеет координаты в вспомогательной СК:

$$\mathbf{A}_{i-1}^N = \mathbf{A}_{i-1} \times M_{0 \rightarrow N}(q_i). \quad (3)$$

Положение ортов  $\mathbf{A}_{i-1}$  и  $\mathbf{N}_i$  относительно вспомогательной системы координат изображено на рис. 3. Здесь  $\mathbf{N}_A$  — общий вектор нормали к плоскости, содержащей орты  $\mathbf{A}_{i-1}$  и  $\mathbf{N}_i$ ,  $\beta$  — угол между осью  $Y^N$  и вектором  $\mathbf{N}_A$  в плоскости  $X^N O Y^N$ . Координаты орта  $\mathbf{A}_{i-1}$  во вспомогательной системе координат определяются по формуле

$$\mathbf{A}_{i-1}^N = \begin{pmatrix} \sin \alpha_{i-1} \cos \beta \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \beta \\ \cos \alpha_{i-1} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Приравнивая координаты по соответствующим осям к значениям, полученным по формуле (3), находим угол  $\beta$ .

По закону преломления преломленный луч лежит в одной плоскости вместе с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред в точке падения. Поэтому, подставив в формулу (4) вместо  $\alpha_{i-1}$  значение угла  $\alpha_i$ , получим координаты орта  $A_i$  во вспомогательной системе координат:

$$A_i^N = \begin{pmatrix} \sin \alpha_i \cos \beta \\ \sin \alpha_i \sin \beta \\ \cos \alpha_i \end{pmatrix}.$$

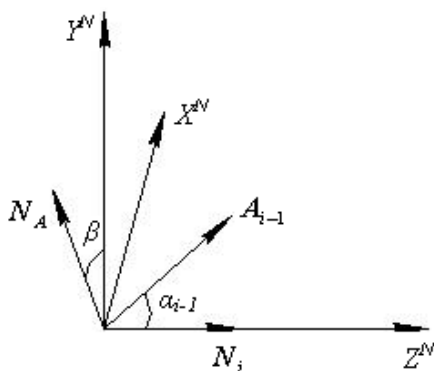


Рис. 3. Расположение ортов  $A_{i-1}$  и  $N_i$  в вспомогательной СК

Вычислим координаты орта преломленного луча в основной СК:

$$A_i = A_i^N \times M_{0 \rightarrow N}^{-1}(q_i), \quad (5)$$

где  $M_{0 \rightarrow N}^{-1}(q_i)$  — обратная матрица направляющих косинусов из выражения (3).

В диспергирующем устройстве возможно применение автоколлимационных или ломающих оптическую ось плоских зеркал.

В случае отражения света от зеркальной поверхности орт нормали будет направлен в сторону отраженного луча (рис. 4).

Орт нормали при развороте зеркальной поверхности на угол  $q_i$  имеет следующий вид:

$$N_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin q_i \\ -\cos q_i \end{pmatrix}.$$

Согласно закону отражения направление распространения луча после отражения меняется на противоположное и угол отражения по абсолютному значению равен углу падения. Падающий и отраженный лучи вместе с нормалью к точке падения лежат в одной плоскости. Из этого следует, с учетом расположения векторов в основной СК (см. рис. 4), что угол между ортом нормали и отраженным лучом вычисляется по формуле

$$\alpha_i = \pi - \alpha_{i-1}. \quad (6)$$

В остальном расчет координат орта отраженного луча выполняется так же, как и расчет луча при преломлении.

Задавая входной луч, как  $A_0 = A_{\text{вх}}$  и производя последовательно расчет хода луча на каждой поверхности раздела сред, определяем координаты на выходе диспергирующего устройства  $A_{\text{вых}}$ .

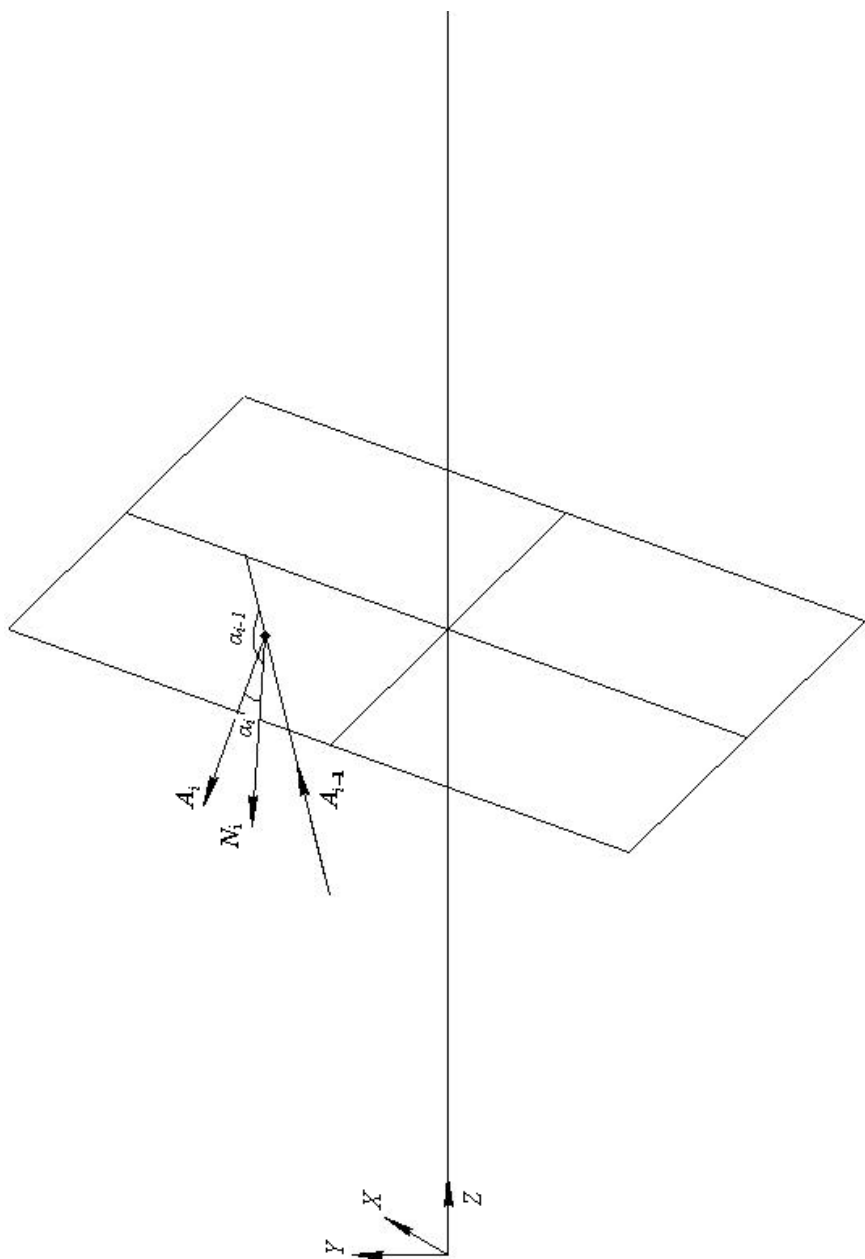


Рис. 4. Отражение луча света от плоской зеркальной поверхности

Для определения основных спектральных характеристик спектрометра рассчитаем ход полихроматического осевого пучка лучей в меридиональной плоскости  $A_{\text{мерид}}(\lambda)$ .

Угловая дисперсия в области  $\Delta\lambda$  длины волны  $\lambda$  вычисляется по формуле:

$$D_{\varphi}(\lambda) = \frac{\arccos(A_{\lambda+\Delta\lambda}(z)) - \arccos(A_{\lambda}(z))}{\Delta\lambda}, \quad (7)$$

где  $A_{\lambda}(z)$  — значение координаты луча света длиной волны  $\lambda$  на выходе диспергирующего устройства по оси  $OZ$ ;  $\Delta\lambda$  — приращение длины волны.

Линейная дисперсия рассчитывается из угловой по формуле

$$D_l(\lambda) = f'_f \tan(D_{\varphi}(\lambda)), \quad (8)$$

где  $f'_f$  — фокусное расстояние фокусирующего объектива.

Спектральное разрешение аппаратуры можно определить как произведение полуширины аппаратной функции для каждой длины волны на величину обратной линейной дисперсии [4]:

$$\delta\lambda = \Delta y(\lambda) \frac{1}{D_l(\lambda)}, \quad (9)$$

где  $\Delta y(\lambda)$  — полуширина спектральной аппаратной функции.

Еще одной важной характеристикой ГСА является кривизна спектральных линий, т. е. изображения входной щели в плоскости ФПУ аппаратуры оказываются искривленными в зависимости от длины волны [4].

Кривизна спектральной линии на длине волны  $\lambda$  определяется расчетом хода монохроматического пучка лучей, равномерно распределенных по полю от одного края входной щели до другого. Полученный набор точек  $(X, Y)$  пересечения лучей с плоскостью изображения аппроксимируется полиномом второй степени:

$$Y = AX^2 + BX + C, \quad (10)$$

где  $A, B, C$  — коэффициенты полинома вычисляются методом наименьших квадратов.

Формула (10) представляет собой уравнение спектральной линии на длине волны  $\lambda$  в плоскости изображения. Максимально допустимая кривизна оценивается по стрелке прогиба кривой:

$$S_y = Y_{\text{кр}} - Y_{\text{ц}},$$

где  $Y_{\text{кр}}$  и  $Y_{\text{ц}}$  — координаты пересечения главного и крайнего лучей с плоскостью изображения.

**Пример.** По данной методике были рассчитаны спектральные характеристики гиперспектральной аппаратуры, созданной на Красногорском заводе им. С.А. Зверева.

Аппаратура работает в диапазоне 0,4...0,95 мкм со спектральным разрешением 5...10 нм. В результате проработок рабочий спектральный диапазон был разбит на два поддиапазона с границами: 0,40...0,65 мкм с  $\lambda_0 = 0,47$  мкм, геометрической серединой спектра поддиапазона ВД1 и ВД2 и канал ВД1; 0,63...0,95 мкм ( $\lambda_0 = 0,73$  мкм).

Приемники в каналах ВД1 и ВД2 — кадровые матрицы формата  $1024 \times 256$  элементов с размерами элемента дискретизации  $18 \times 18$  мкм.

В спектрометре аппаратуры используется автоколлимационная схема с призменным диспергирующим устройством (рис. 5). В этой схеме функции объективов коллимирующего и фокусирующего объединены в одном объективе — ОКФ, который работает в прямом и обратном ходе.

Входная щель спектрометра расположена в фокальной плоскости коллимирующего объектива с фокусным расстоянием  $f'_{\text{кол}}$  и смещена с оптической оси на угол  $\gamma$  относительно главной плоскости объектива, что соответствует координате по оси  $OY$   $y = f'_{\text{кол}} \tan(\gamma)$ .

Падающий луч задается ортом  $A_{\text{вх}}(x, \gamma)$ , с координатой  $x$  на прямой, проходящей через середину (по высоте) входной щели:

$$A_{\text{вх}}(x, \gamma) = \begin{pmatrix} -\frac{x \cos \gamma}{\sqrt{f'_{\text{кол}}{}^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \\ -\frac{f'_{\text{кол}} \sin \gamma}{\sqrt{f'_{\text{кол}}{}^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \\ \frac{f'_{\text{кол}} \cos \gamma}{\sqrt{f'_{\text{кол}}{}^2 + x^2 \cos^2 \gamma}} \end{pmatrix}.$$

На основе изложенной выше методики все математические расчеты и визуализация результатов были запрограммированы в системе MATLAB. Результаты расчета угловой дисперсии и спектрального разрешения в каналах ВД1 и ВД2 аппаратуры представлены на рис. 6 и 7.

Пунктирной линией на рис. 7 изображены кривые измеренных значений интервала спектральной выборки. Как видно по этим кривым, расчетные значения хорошо совпадают с измеренными данными, полученными при калибровке гиперспектральной аппаратуры.



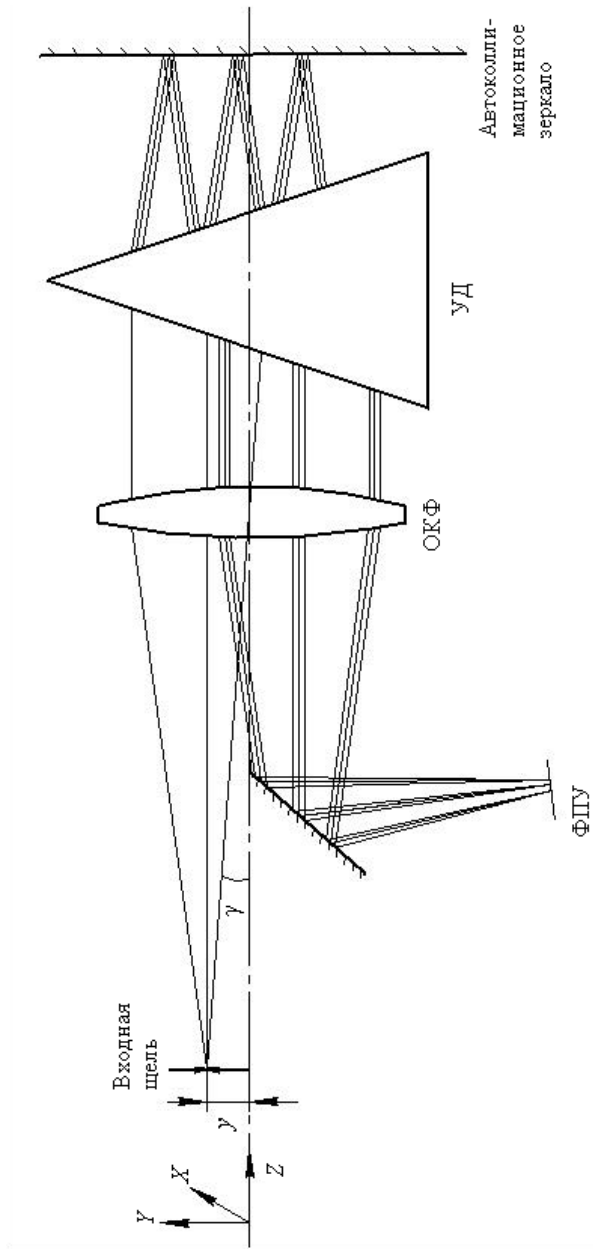
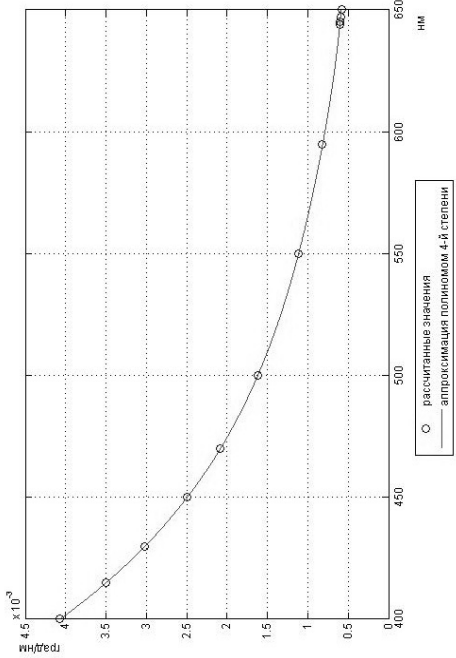
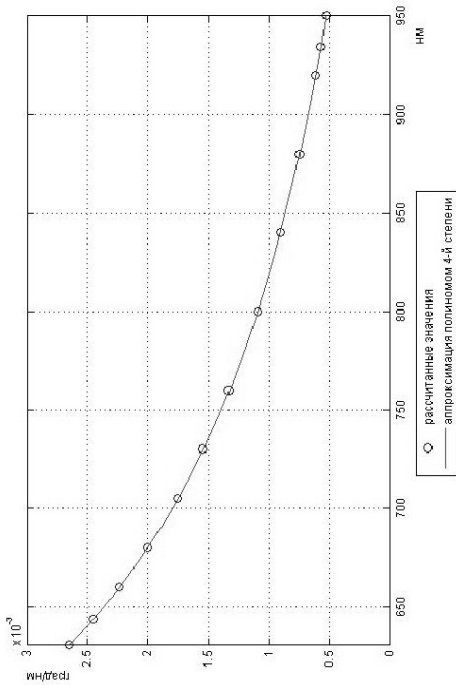


Рис. 5. Схема спектрометра

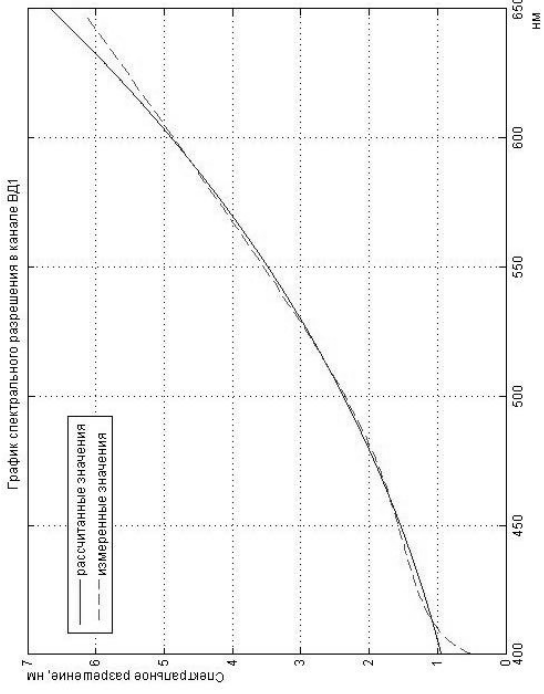


a

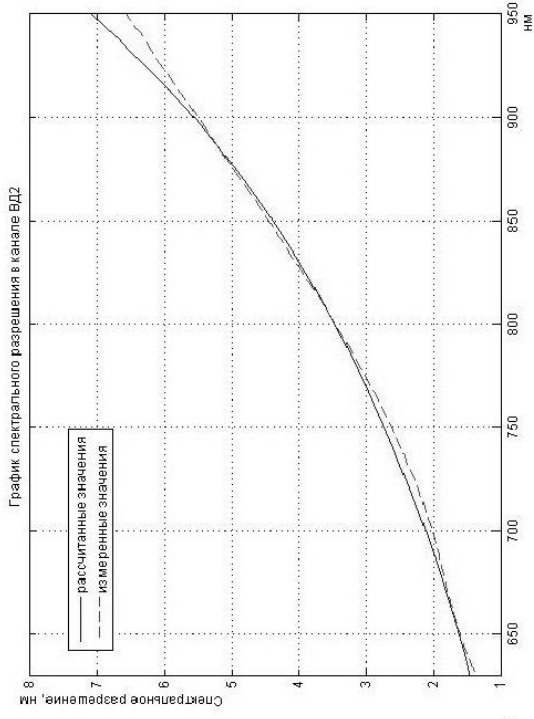


b

Рис. 6. Зависимость угловой дисперсии от длины волны в каналах ВД1 (а) и ВД2 (б)

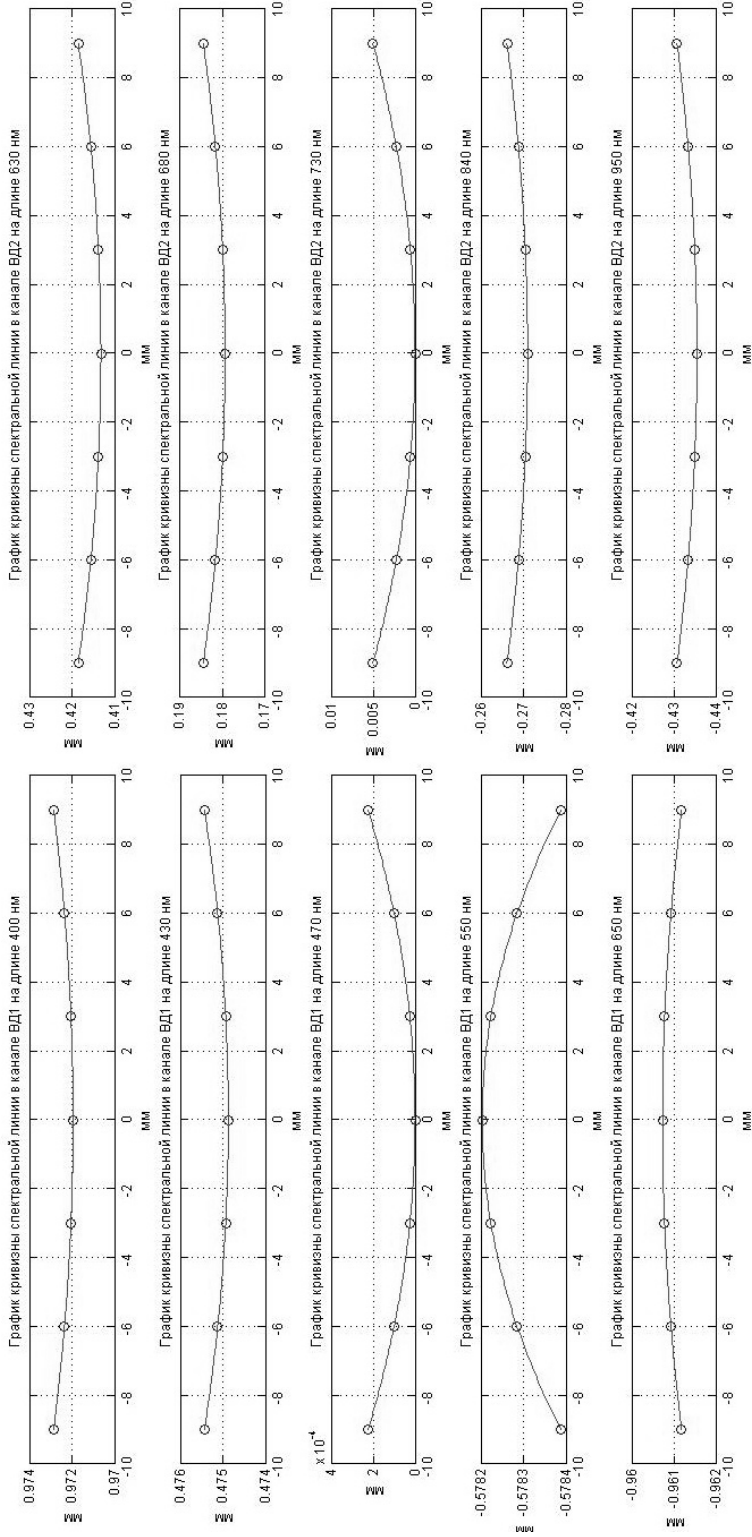


*a*



*b*

**Рис. 7. Зависимость спектрального разрешения в каналах ВД1 (а) и ВД2 (б) от длины волны**



**Рис. 8. Кривизна изображений входной щели для различных длин волн в каналах ВД1 и ВД2**

Кривизна спектральных линий рассчитывалась по семи точкам, вычисленным для пяти длин волн, равномерно распределенных по спектральному диапазону каждого канала.

По расчетным данным стрелка прогиба спектральных линий не превышает 1 мкм в канале ВД1 и 5,5 мкм в канале ВД2 (рис. 8).

Полученные по изложенной методике расчета результаты хорошо согласуются с реальными измеренными значениями спектральных характеристик аппаратуры и могут использоваться на этапе проектирования как критерий для оптимизации схемотехнических и конструктивных параметров.

Таким образом, в статье предложена методика расчета основных спектральных характеристик гиперспектральной аппаратуры и на ее основе написана программа в среде MATLAB для определения дисперсии, спектрального разрешения и кривизны спектральных линий. Проверочный расчет для гиперспектральной аппаратуры, созданной на Красногорском заводе им. С.А. Зверева показал хорошее соответствие расчетных и реальных данных, что говорит о возможности использования данной методики как на этапе проектирования новой ГСА, так и на этапе оценки качества изображения готовой аппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов К.В. Направления развития отечественных средств ДЗЗ и общие вопросы создания бортовой аппаратуры // Сб. материалов 9-й научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». 2012 г. С. 96, 97.
2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
3. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.
4. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012