

## Моделирование формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера

А.А. Расторгуев<sup>1</sup>, С.И. Харитонов<sup>2,3</sup>, Н.Л. Казанский<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия,

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

### Аннотация

В настоящей работе разработана математическая модель формирования изображения, которая позволяет создавать прогнозные гиперспектральные изображения. Модель учитывает формирование оптического изображения с помощью матричного фотоприёмника. В работе приведено численное моделирование формирования гиперспектрального изображения, проведены оценки пространственного, спектрального разрешения, а также адекватности полученных результатов.

**Ключевые слова:** бортовой гиперспектрометр, формирование изображения, схема Оффнера, матричный фотоприёмник, разрешающая способность, численное моделирование.

**Цитирование:** Расторгуев, А.А. Моделирование формирования изображения космическим гиперспектрометром по схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 12-21. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-644.

**Citation:** Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling of image formation with a space-borne Offner hyperspectrometer. Computer Optics 2020; 44(1): 12-21. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-644.

### Введение

Задача моделирования работы гиперспектрометра с получением модельного гиперспектрального изображения актуальна на различных стадиях создания прибора. Например, на предпроектной и проектной стадиях (при формировании требований к аппаратуре) данное моделирование позволяет: оценить качество изображения, линейную и спектральную разрешающую способность, качество спектральных характеристик; оценить возможности аппаратуры по разделению спектральных пар «объект-фон» [1]; проанализировать и выбрать информативные спектральные каналы и признаки для решения задач обнаружения и распознавания объектов на гиперспектральных изображениях [2, 3]; исследовать, сформировать и оптимизировать алгоритмы обработки гиперспектральных изображений [4], и т.д.

Варьирование параметрами гиперспектрометра позволит подобрать наиболее подходящий вариант, который обеспечит решение определённого класса задач для тематических потребителей информации [5].

На сегодняшний день существующие модели формирования гиперспектрального изображения имеют достаточно общий характер и не учитывают особенностей работы конкретной оптической схемы [6]. Обычно рассматриваются идеализированные модели приборов, которые не учитывают шумы фотозаписывающего преобразователя, погрешности изготовления, абберации, физику формирования и реги-

страции оптического изображения гиперспектральной аппаратурой. При этом отмечается, что важным для понимания особенностей работы прибора является изучение процессов формирования разложенного в спектр оптического изображения, регистрации освещённости фотоприёмником в зависимости от условий съёмки [6].

Отсюда следует актуальность проведения настоящей работы, где рассматривается моделирование формирования изображения гиперспектрометром по схеме Оффнера, который является одной из перспективных концепций компактной гиперспектральной аппаратуры [7–9]. Настоящая работа является логическим продолжением достаточно большого числа уже проведённых в данном направлении научно-исследовательских работ как теоретического, так и практического характера [10–17].

В настоящей работе рассматривается моделирование формирования изображения подстилающей поверхности Земли гиперспектрометром по схеме Оффнера в рамках геометрической оптики. Для моделирования оптической части использовалась математическая модель гиперспектрометра с параметрами, представленными в работах [12, 16, 17].

### 1. Постановка задачи

Исходя из актуальности исследования, для разработки настоящей модели необходимо связать оптические и фотозаписывающие характеристики прибора с параметрами прогнозного изображения.

Модель должна использовать следующие входные данные по параметрам предметной плоскости:

- о пространственной «геометрии» и индикатрисах спектральных коэффициентов отражения сцены в предметной плоскости;
- о спектральной облучённости подстилающей поверхности, спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) дымки, спектральном коэффициенте пропускания атмосферы Земли;
- о положении предметной плоскости в момент съёмки.

В части входных данных по оптико-электронной части гиперспектрометра модель должна использовать:

- параметры и положение оптических поверхностей, щелевой диафрагмы;
- информацию о материалах оптических элементов;
- параметры дифракционной решётки;
- параметры фотоэлектрического преобразователя.

При моделировании движения оптического изображения модель должна использовать расчётный вектор скорости движения изображения в плоскости регистратора.

На выходе данная модель должна формировать гиперспектральное изображение.

### 2. Допустимые ограничения при моделировании формирования изображения

Пусть в рамках модели имеются следующие ограничения:

- будем считать, что в пределах строящегося изображения объекта наша оптическая система гиперспектрометра локально изопланатична, т.е. функция рассеяния точки (ФРТ), аберрации и т.д. изменяются незначительно, т.е. постоянны в пределах строящегося изображения, для каждого узкого интервала длин волн;
- будем считать, что дальность от всех точек регистрируемого объекта до задней главной плоскости объектива гиперспектрометра за время, когда производится экспонирование кадров и формирование изображения, изменяется на малую величину и приблизительно постоянна;
- телесный угол входного зрачка гиперспектрометра в пределах строящегося изображения объекта изменяется слабо, т.е. постоянен;
- примем, что для осей  $(x, y)$  в плоскости регистратора гиперспектрометра ось  $y$  направлена по направлению щели гиперспектрометра, а ось  $x$  – перпендикулярно указанному направлению.

### 3. Моделирование формирования изображения в оптико-электронном тракте

#### 3.1. Моделирование формирования оптического изображения

Пусть мы имеем в предметной плоскости объект с распределением яркости  $L=L(x', y', \lambda)$ , изображение ко-

торого необходимо построить. Если бы оптическая система (ОС) была идеальной, то точке предметной плоскости соответствовала точка в плоскости изображения. Тогда для каждого порядка дифракции  $m$  и длины волны  $\lambda$  функция, описывающая такое распределение освещённости в плоскости изображения, имеет вид [18]:

$$B_m(u, v, \lambda) = K_m(\lambda) L\left(\frac{u}{\beta}, \frac{v}{\beta}, \lambda\right), \tag{1}$$

где  $B_m(u, v, \lambda)$  – функция идеального распределения освещённости в плоскости регистратора,  $u, v$  – координаты в плоскости изображения,  $\beta$  – масштабирующий коэффициент оптической системы,  $K(\lambda)$  – коэффициент, учитывающий преобразование энергии. При этом очевидно, что координаты в предметной плоскости и плоскости изображения связаны соотношениями  $u = \beta x', v = \beta y'$ .

Любая оптическая система преобразует точку в распределение освещённости. Рассмотрим малую излучающую площадку  $S$ , расположенную в предметной плоскости. Будем считать, что эта площадка настолько мала, что в её пределах исходящий лучистый поток приблизительно постоянен, а саму площадку приближённо будем считать точечным источником. В плоскости регистратора гиперспектрометра (с учётом нормировки на число пришедших лучей) данный точечный источник создаёт функцию распределения вида:

$$h_{m,\lambda}(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{\eta(\lambda)} \delta \times \times (x - \tilde{x}(\theta, \varphi, \lambda), y - \tilde{y}(\theta, \varphi, \lambda)) \times \sin^2(\theta) d\theta d\varphi, \tag{2}$$

где  $h_{m,\lambda}(x, y)$  – функция распределения в плоскости регистратора,  $\delta(x, y)$  – регулярная аппроксимация сингулярной функции Дирака,  $\tilde{x}, \tilde{y}$  – координаты прихода луча, исходящего из точечного источника  $S$  в направлении, определяемом углами  $(\theta, \varphi)$ , в плоскость регистратора.  $\eta(\lambda)$  – суммарное число лучей, пришедших в плоскость регистратора. Интегрирование ведётся по всем направлениям лучей, которые попадают в плоскость регистратора. В качестве регулярной аппроксимации сингулярной функции Дирака используется гладкая функция:

$$\delta(x, y) = (1/2\pi\sigma) \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2), \tag{3}$$

где  $b\sigma = \Delta$ ,  $\Delta$  – размер пиксела фотоприёмника.

Так как функция распределения  $h_{m,\lambda}(x, y)$  нормирована на число лучей (2), то можно назвать её нормированной монохроматической функцией рассеяния точки (НМФРТ) [18], при этом будет выполняться соотношение:

$$\iint_{\gamma} h_{m,\lambda}(x, y) dx dy = 1, \tag{4}$$

где область  $\gamma$  включает все точки, где функция  $h_{m,l}(x,y)$  отлична от нуля. Формула (4) показывает, что в плоскость регистратора приходит суммарный световой поток, равный 1.

Каждую точку предметной плоскости с распределением яркости  $L=L(x',y',\lambda)$ , НМФРТ  $h_{m,l}(x,y)$  преобразует к распределению освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра.

Учтём влияние атмосферы на размытие изображения. Для этого воспользуемся известным соотношением, которое описывает снижение качества изображения ОС из-за атмосферной турбулентности [19]:

$$H_{TURB}(v_x, v_y) = \exp\left(-2\pi^2 Q^2 f^2 (v_x^2 + v_y^2)^{5/6}\right), \quad (5)$$

где  $H_{TURB}(v_x, v_y)$  – функция передачи модуляции (ФПМ) размытия атмосферы (в настоящей работе под ФПМ понимается частотно-контрастная характеристика, которая описывает снижение значения контраста относительно исходного в зависимости от пространственной частоты),  $(v_x, v_y)$  – пространственные частоты по осям  $(x, y)$   $f$  – фокусное расстояние ОС,  $Q$  – коэффициент, учитывающий действие турбулентности.

Для использования данного соотношения получим ФПМ ОС гиперспектрометра в частотной области как преобразование Фурье от НМФРТ [20]:

$$H_{m,\lambda}(v_x, v_y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} h_{m,\lambda}(x, y) \times \exp(-2\pi i(v_x x + v_y y)) dx dy, \quad (6)$$

где  $H_{m,\lambda}(v_x, v_y)$  – ФПМ ОС гиперспектрометра,  $h_{m,\lambda}(x, y)$  – НМФРТ ОС гиперспектрометра.

НМФРТ ОС гиперспектрометра с учётом влияния атмосферы на размытие изображения определяется следующим соотношением:

$$h_{m,\lambda}(x, y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} H_{m,\lambda}(v_x, v_y) \cdot H_{TURB}(v_x, v_y) \times \exp(2\pi i(v_x x + v_y y)) dv_x dv_y. \quad (7)$$

Кроме преобразования структуры, ОС гиперспектрометра осуществляет масштабирование, смещение и разложение в спектр каждой точки распределения яркости  $L=L(x',y',\lambda)$ . Тогда на основании [12] запишем выражение для функции, осуществляющей данные преобразования:

$$g_{m,\lambda}(x, y) = h_{m,\lambda}(x, y) \otimes \delta(x - u - \alpha\lambda m, y - v) = g_{m,\lambda}(x - u - \alpha\lambda m, y - v), \quad (8)$$

где  $u, v$  – координаты в плоскости изображения описывают смещение и масштабирование, а  $\alpha\lambda m$  – преобразование разложения в спектр в плоскости регистратора. Коэффициент  $\alpha$  определяется периодом дифракционной решётки и параметрами оптической схемы, а

также является кратным значению линейной дисперсии гиперспектрометра. Функция  $g_{m,\lambda}(x - u - \alpha\lambda m, y - v)$  описывает не только преобразование структуры, как в случае с НМФРТ, но и смещения, масштабирования и разложения в спектр падающего на ОС гиперспектрометра распределения яркости из предметной плоскости.

Допустим, что гиперспектрометр находится на космическом аппарате, который за время съёмки обрабатывает определённую программу углового движения. Тогда с приращением времени  $dt$  щель гиперспектрометра будет вырезать разное яркостное поле объекта, т.е. положение значений функции идеального распределения освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра будет зависеть от времени  $B_m = B_m(u(t), v(t), \lambda)$ . Тогда на основании [12,18], а также с учётом (1) можно записать выражение для изменения распределения освещённости в плоскости регистратора с течением времени  $t$ :

$$E(x, y, \lambda, t) = \sum_m \int_{u_1}^{u_2} B_m(u(t), v(t), \lambda) \times g_{m,\lambda}(x - u - \alpha\lambda m, y - v) du dv d\lambda dt, \quad (9)$$

где  $E(x, y, \lambda, t)$  – спектральная функция изменения распределения освещённости в плоскости регистратора, модуль разности  $|u_1 - u_2|$  определяет значение ширины щели гиперспектрометра.

Т.к. мы используем математическую модель ОС гиперспектрометра, то для функции  $B_m(u, v, \lambda)$  коэффициент, учитывающий преобразование энергии, имеет вид:

$$K_m(\lambda) = \Omega(\lambda) C_m(\lambda) \tau_{OB}(\lambda) / \beta^2, \quad (10)$$

где  $\Omega(\lambda)$  – суммарный телесный угол лучей, прошедших ОС гиперспектрометра,  $C_m(\lambda)$  – спектральная интенсивность порядка дифракции,  $\tau_{OB}(\lambda)$  – интегральный коэффициент пропускания объектива гиперспектрометра.

При моделировании работы гиперспектрометра будем использовать среднее значение коэффициента интенсивности, вычисляемое по формуле:

$$C_m(\lambda) = \eta(\lambda)^{-1} \sum_{i=1}^n C_m^i(\lambda), \quad (11)$$

где  $\eta(\lambda)$  – число лучей, пришедших в плоскость регистратора для выбранной длины волны.

### 3.2. Моделирование регистрации освещённости матричным фотоприёмником

Предварительно преобразуем спектральную функцию изменения распределения освещённости к следующему виду:

$$W(x, y, \lambda, t) = E(x, y, \lambda, t) \cdot \lambda \cdot S(\lambda) / (h \cdot c), \quad (12)$$

где  $W(x, y, \lambda, t)$  – спектральная функция изменения распределения электронов, генерируемых элементами матричного фотоприёмника,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $S(\lambda)$  – спектральная квантовая эффективность матричного фотоприёмника.

Для объяснения получения изображения на регистраторе опишем его работу следующим образом. Пусть регистратор математически представляет из себя матричный фотоприёмник, то есть является двумерным массивом  $m \times n$  светочувствительных элементов.

Так как распределение освещённости в плоскости регистратора  $E(x, y, \lambda, t)$  (и соответствующая ему функция  $W(x, y, \lambda, t)$ ) изменяется во времени, то для регистрации сигнала необходимо использовать последовательность кадров, полученных с каждого элемента фотоприёмника. Каждый кадр, характеризуемый временем кадра  $T_{FR}$ , формируется в течение интервала времени  $t_2 - t_1 = t_{EXP}$ , который называется временем накопления. Передаточную функцию дискретизации по последовательности кадров с шагом  $T_{FR}$  можно представить как результат воздействия ограниченной последовательности прямоугольных импульсов длительностью  $t_{EXP}$  в виде суммы [21]:

$$s_i(t) = \sum_{i=1}^K \text{rect}_{t_{EXP}}(t - i \cdot T_{FR}), \quad (13)$$

где  $I$  – номер кадра,  $K$  – общее число кадров. Функция  $\text{rect}_{t_{EXP}}(t - i \cdot T_{FR})$  описывает действие смещённого на время  $i$ -го кадра прямоугольного импульса длительностью  $t_{EXP}$ .

Действие передаточной функции  $s_i(t)$  на функцию  $W(x, y, \lambda, t)$ :

$$\begin{aligned} W(x, y, \lambda, t) \otimes s_i(t) &= \\ &= \sum_{i=1}^K \int_{i \cdot T_{FR} - 0.5 \cdot t_{EXP}}^{i \cdot T_{FR} + 0.5 \cdot t_{EXP}} W(x, y, \lambda, t) dt = \sum_{i=1}^K \tilde{W}_i(x, y, \lambda), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $W(x, y, \lambda, t)$  – суммарная спектральная функция распределения электронов для каждого  $i$ -го кадра.

Помимо сказанного выше, каждый из элементов матричного фотоприёмника за время накопления интегрирует падающий на него диапазон длин волн  $\Delta\lambda$ . Передаточная функция данного преобразования имеет вид:

$$wv(\lambda) = \text{rect}(\lambda / \Delta\lambda). \quad (15)$$

Действие передаточной функции  $wv(\lambda)$  на функцию  $W(x, y, \lambda, t)$  с учётом (9):

$$\begin{aligned} W(x, y, \lambda, t) \otimes s_i(t) \otimes wv(\lambda) &= \\ &= \sum_{i=1}^K \int_{\Delta\lambda} \tilde{W}_i(x, y, \lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^K \tilde{\tilde{W}}_i(x, y), \end{aligned} \quad (16)$$

где функция  $\tilde{\tilde{W}}_i(x, y)$  описывает распределение электронов для каждого  $i$ -го кадра.

И наконец, каждый из элементов матричного фотоприёмника проводит пространственное интегриро-

вание и дискретизацию сигнала. Пусть элементы приёмника имеют форму квадрата с размером стороны  $d$ . Тогда передаточная функция преобразования и дискретизации имеет вид [21]:

$$p_{m,n}(x, y) = \text{rect}_d(x - m \cdot \Delta x, y - n \cdot \Delta y), \quad (17)$$

где функция  $\text{rect}_d(x - m \cdot \Delta x, y - n \cdot \Delta y)$  для каждого  $i$ -го кадра описывает усреднение по массиву  $m \times n$  светочувствительных элементов с размером стороны  $d$  и с шагом между центрами элементов  $\Delta x, \Delta y$ .

На основании последовательности преобразования сигнала (13 – 17) напишем общее выражение для сигнала с  $m, n$ -го элемента фотоприёмника в электронах за время накопления для последовательности кадров.

$$\begin{aligned} J_{i,m,n} &= W(x, y, \lambda, t) \otimes s_i(t) \otimes wv(\lambda) \otimes p_{m,n}(x, y) = \\ &= \sum_{i=1}^K \int_{i \cdot T_{FR} - 0.5 \cdot t_{EXP}}^{i \cdot T_{FR} + 0.5 \cdot t_{EXP}} \int_{\Delta\lambda} \int_{m \cdot \Delta x - 0.5d}^{m \cdot \Delta x + 0.5d} \int_{n \cdot \Delta y - 0.5d}^{n \cdot \Delta y + 0.5d} W(x, y, \lambda, t) \times \\ &\times dx dy d\lambda dt. \end{aligned} \quad (18)$$

### 3.3. Моделирование аддитивных шумов, возникающих при регистрации матричным фотоприёмником

Промоделируем шумы, возникающие на пикселах регистратора и в электронном тракте.

Будем считать, что на каждом из пикселей приёмника, помимо сигнальных электронов, будут ещё случайным образом генерироваться электроны, обусловленные фотонным шумом фотоэлектрического преобразователя. При этом функция распределения случайной величины шума будет описываться законом Пуассона:

$$P_{i,m,n}^{fot}(q) = \exp(-\lambda_{i,m,n}) \lambda_{i,m,n}^q / q!, \quad (19)$$

где для фотонного шума  $\lambda_{i,m,n} = (J_{i,m,n})^{0.5}$ .

Примем следующее приближение: будем считать, что функция распределения случайной величины шумов фотоэлектрического преобразователя и электронного тракта будет описываться законом Гаусса:

$$P_{i,m,n}^{chann}(q) = \exp(q/2\sigma^2) / \sigma\sqrt{2\pi}, \quad (20)$$

где  $\sigma$  примем равной  $50\bar{e}$  (т.к. для гиперспектральной съёмки в режиме «push-broom» характерны относительно малые времена накопления).

Пусть динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя будет согласован с динамическим диапазоном пикселей регистратора. Тогда для каждого  $i$ -го кадра, суммарный сигнал с  $m, n$ -го пиксела регистратора:

$$Sig_{i,m,n} = J_{i,m,n} + J_{i,m,n}^{fot} + J_{i,m,n}^{chann}, \quad (21)$$

где  $J_{i,m,n}^{fot}, J_{i,m,n}^{chann}$  – реализации случайных величин фотонного шума, шумов электронного тракта и регистратора соответственно (моделирование шумов для каждого кадра и пиксела регистратора проводится методами статистического моделирования, где слу-

чайным образом выбирается значение величины, рас-  
пределённой по заданной функции распределения).

Проквантовав полученный сигнал в соответствии с динамическим диапазоном элемента фотоэлектрического преобразователя, можно преобразовать его в пиксел изображения.

#### 4. Численное моделирование формирования изображения гиперспектрометром

##### 4.1. Исходные параметры моделирования

Для моделирования формирования изображения космическим гиперспектрометром было положено, что вдоль направления  $x$  скорость движения изображения  $V_x = 4,0204$  мм/с, а в направлении щели  $y$  скорость  $V_y \approx 0$  мм/с. Дальность до предметной плоскости  $D = 493$  км. Высота Солнца над горизонтом была положена соответствующей средней высоте дневного Солнца в летний период для Самарской области и была принята равной  $h_s = 50^\circ$ .

В качестве диспергирующего элемента использовалась математическая модель дифракционной решётки с блеском на длине волны  $\lambda = 640$  нм [11].

Моделирование регистрации освещённости проводилось с использованием двух вариантов фотоэлектрических преобразователей CMV2000 [22] (производителя CMOSIS) и MT9M413 [23] (производителя Micron Technology). Частота кадров в процессе съёмки была положена равной 340 кадров/с.

Работа фотоприёмника CMV2000 моделировалась в режиме биннинга в направлении щели (ширина щели выбрана 5,5 мкм), а работа MT9M413 – без биннинга (ширина щели – 12 мкм). Моделирование формирования гиперспектрального изображения проводилось в диапазоне длин волн от 420 нм до 920 нм.

##### 4.2. Результаты моделирования формирования гиперспектрального изображения

Для моделирования гиперспектральной съёмки в качестве тест-объекта было сформировано квадратное полотно, имеющее коэффициент диффузного отражения (альбедо)  $\rho_{\text{ВСКГ}} = 0,9$  для всех длин волн (что примерно соответствует белому материалу). Размер стороны белого полотна – 600 м. На полотно были нанесены штриховые миры с контрастом  $K_t = 0,8$  для всех длин волн. Ширина шпалы миры и межшпального расстояния  $R = 30$  м, длина шпалы миры –  $5R$ .

На рис. 1 показано изображение миры, открытое в программном комплексе (ПК) ENVI [24]. Данное изображение было получено путём численного моделирования с использованием параметров фотоэлектрического преобразователя CMV2000. Для удобства восприятия яркость изображения миры, представленная на рис. 1, была откорректирована. Ширина изображения тест-объекта (определяется кадровой частотой и формируется вдоль направления движения) составила 28 пикселов, высота изображения (определя-

ется пикселями регистратора вдоль направления щели) – 31 пиксел.

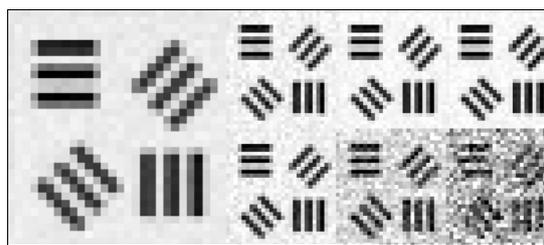


Рис. 1. Укрупнённое изображение в ПК ENVI RGB композита ( $R \sim 685$  нм,  $G \sim 555$  нм,  $B \sim 495$  нм) и монохромных изображений миры на длинах волн  $\sim 425$  нм, 500 нм, 600 нм, 700 нм, 800 нм, 900 нм (слева направо)

На рис. 2, 3 показаны изображения спектральных характеристик произвольных пикселов фона и шпалы миры в ПК ENVI. По направлению оси «Wavelength» откладываются длины волн, а по оси «Value» – значения яркостей.

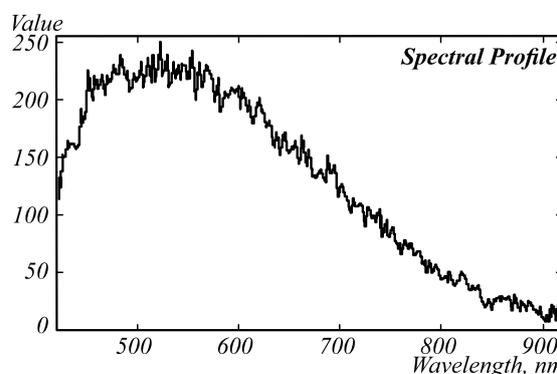


Рис. 2. Изображение спектральной характеристики в ПК ENVI произвольного пиксела изображения белого полотна материала

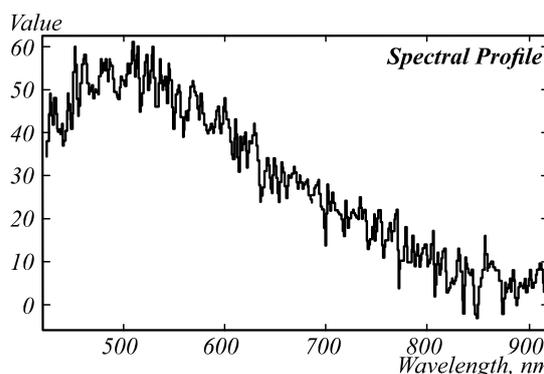


Рис. 3. Изображение спектральной характеристики в ПК ENVI произвольного пиксела изображения шпалы миры

В результате моделирования (для CMV2000) было получено гиперспектральное изображение тест-объекта в 221 спектральном канале. Ширина спектральной области канала составила  $\sim 2,26$  нм.

Для сравнения было также построено изображение рассматриваемого тест-объекта с использованием фотоприёмного устройства MT9M413. Для удобства восприятия яркость изображения миры, представленная на рис. 4, также была откорректирована.

Ширина изображения тест-объекта (определяется кадровой частотой и формируется вдоль направления движения) составила 29 пикселей, высота изображения (определяется пикселями регистратора вдоль направления щели) – 30 пикселей.

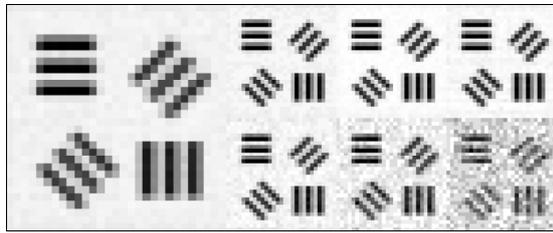


Рис. 4. Укрупнённое изображение в ПК ENVI RGB композита ( $R \sim 685$  нм,  $G \sim 555$  нм,  $B \sim 495$  нм) и монохромных изображений миры на длинах волн  $\sim 425$  нм, 500 нм, 600 нм, 700 нм, 800 нм, 900 нм (слева направо)

На рис. 5, 6 показаны изображения спектральных характеристик произвольных пикселей изображения фона и шпалы миры.

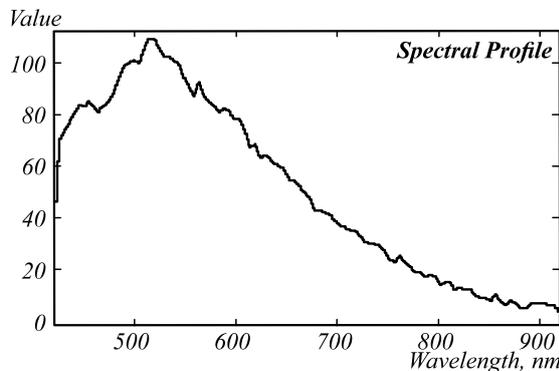


Рис. 5. Изображение спектральной характеристики в ПК ENVI произвольного пикселя изображения белого полотна материала

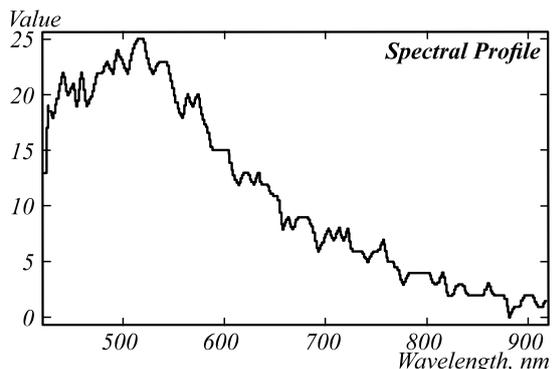


Рис. 6. Изображение спектральной характеристики в ПК ENVI произвольного пикселя изображения шпалы миры

В результате моделирования (для МТ9М413) получено изображение в 102 спектральных каналах. Ширина спектральной области канала составила  $\sim 5$  нм.

По полученным результатам моделирования видно, что фотоприёмное устройство CMV2000 позволяет получить гиперспектральное изображение с большим числом спектральных каналов, имеющее около 240 уровней яркости (для  $\lambda = 555$  нм), против фото-

приёмника МТ9М413 с изображением, имеющим около 110 уровней яркости для белого полотна тест-объекта в рассматриваемых условиях съёмки. Меньший уровень яркости на фотоприёмнике МТ9М413 объясняется тем, что на 1 единицу яркости для него приходится  $\approx 63\bar{e}$  против  $\approx 13\bar{e}$  для CMV2000. Однако преимуществом использования МТ9М413 (по сравнению с CMV2000) является меньший уровень шумов на изображении ввиду того, что фоточувствительный элемент имеет большую площадь.

4.3. Оценка разрешающей способности гиперспектрального прибора с использованием монохромных изображений тест-объектов

Для визуальной оценки линейной разрешающей способности гиперспектрального прибора были промоделированы изображения (в спектральном канале, соответствующем длине волны  $\lambda = 555$  нм) для набора трёхшпальных и радиальных миры (рис. 7). При моделировании использовались параметры матричного фотоприёмника CMV2000. Изображения получены при съёмке в надир.

По полученным изображениям можно заключить, что шпалы трёхшпальной миры различаются при  $R = 20$  м, а радиальной миры  $R = 25$  м.

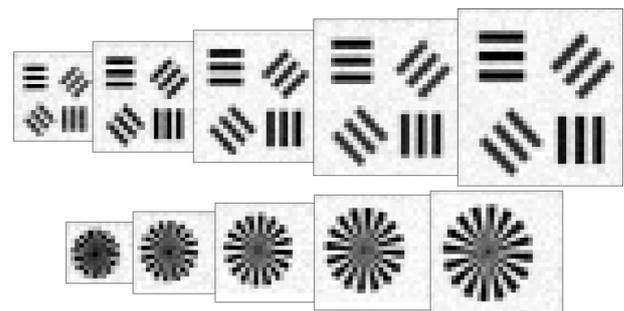


Рис. 7. Набор изображений двух вариантов тест-объектов. Для трёхшпальной миры, ширина шпалы и межшпального расстояния: 20 м, 25 м, 30 м, 35 м, 40 м (слева направо). Для радиальной миры, длина дуги шпалы и дуги межшпального расстояния на краю: 20 м, 25 м, 30 м, 35 м, 40 м. Радиусы миры: 101,9 м, 127,3 м, 152,8 м, 178,3 м, 203,7 м (слева направо)

Также для визуального представления о геометрических параметрах изображения, получаемого космическим гиперспектральным прибором, было проведено моделирование формирования монохромного изображения в спектральном канале прибора. Результат моделирования представлен на рис. 8.

Моделирование проводилось при съёмке в надир и с использованием параметров матричного фотоприёмника CMV2000. В качестве исходных данных в предметной плоскости использовалось панхроматическое изображение с МКА Аист-2Д с проекцией пиксела 1,48 м. Для визуальной оценки на полученном изображении ширина взлётно-посадочной полосы  $\sim 60$  м, ширина малых рулѐжных дорожек с внешней стороны полосы  $\sim 25$  м.



Рис. 8. Монохромное изображение аэропорта в г. Сан-Диего (США), сформированное математической моделью космического гиперспектрометра в канале, соответствующем длине волны  $\lambda \sim 555$  нм

### 5. Оценка адекватности полученных результатов

#### 5.1. Описание используемой математической модели

Проведём оценку адекватности полученных результатов моделирования с использованием математической модели для прогнозирования разрешения, которая базируется на математической зависимости вероятности обнаружения шпалы миры  $P(\Delta L, K_t)$  от величины воспринимаемого отношения сигнал/шум  $\psi(\Delta L, K_t)$  [25]:

$$P(\Delta L, K_t) = 0,8 \times \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{(\psi(\Delta L, K_t) - \psi_{THR})}{\sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (22)$$

где  $\psi_{THR} = 4$  пороговая величина воспринимаемого отношения сигнал/шум, соответствующая вероятности обнаружения 0,8,  $K_t$  – контраст шпал миры,  $\Delta L$  – ширина шпалы,  $\operatorname{erf}(z)$  – функция ошибок.

Наиболее полное описание рассматриваемой модели представлено в работе [25].

#### 5.2. Соотношения, используемые для расчёта ФПМ сквозного тракта гиперспектрометра

Так как мы рассматриваем моделирование работы гиперспектральной аппаратуры, то при расчёте воспринимаемого отношения сигнал/шум  $\psi_{ВП}$  в каждом из спектральных каналов необходимо использовать соответствующую им полихроматическую ФПМ.

Выражение для ФПМ сквозного тракта имеет вид:

$$H_{\Sigma}(\nu) = H_{TURB}(\nu) \cdot H_{OS}(\nu) \cdot H_{PHOTD}(\nu) \times H_{BLUR}(\nu) \cdot H_{PHASE}(\nu), \quad (23)$$

где  $\nu$  – пространственная частота,  $H_{\Sigma}(\nu)$  – суммарная полихроматическая ФПМ для каждого из спектральных каналов гиперспектрометра,  $H_{TURB}(\nu)$  – ФПМ турбулентности атмосферы (5),  $H_{OS}(\nu)$  – ФПМ спектрального канала ОС гиперспектрометра на средней длине волны,  $H_{PHOTD}(\nu)$  – ФПМ элемента фотоприёмного устройства,  $H_{BLUR}(\nu)$  – ФПМ «смаза» изображения за время интегрирования,  $H_{PHASE}(\nu)$  – ФПМ фазо-

вого положения миры относительно пикселей регистратора [25].

На рис. 9, 10 приведены расчётные ФПМ по направлению движения изображения и в направлении щели гиперспектрометра для расчётных условий съёмки, представленных в параграфе 4 настоящей статьи.

Размер элемента фотоприёмника CMV2000 вдоль направления движения  $d_x = 5,5$  мкм, а в направлении щели гиперспектрометра  $d_y = 11$  мкм (с учётом биннинга). Для оптической системы гиперспектрометра показана ФПМ на  $\lambda = 555$  нм.

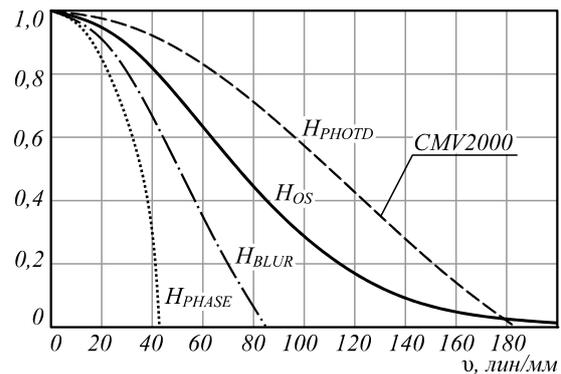


Рис. 9. Изображение ФПМ вдоль направления движения изображения

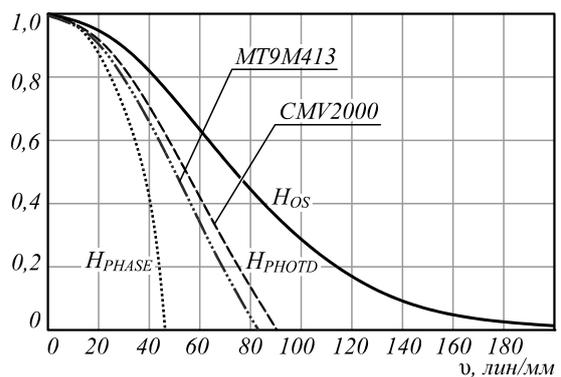


Рис. 10. Изображение ФПМ в направлении щели гиперспектрометра

#### 5.3. Соотношения, используемые для расчёта отношения сигнал/шум в спектральном канале

Оценку адекватности полученных результатов будем проводить путём решения уравнения (22) с использованием выражения для расчёта отношения сигнал/шум в спектральном канале:

$$\psi_0 = n_{SIG} / \sigma_{\Sigma} = n_{RECT} / \sqrt{\sigma_{CHANN}^2 + n_{\Sigma}}, \quad (24)$$

где  $\psi_0$  – отношение сигнал/шум на нулевой пространственной частоте,  $n_{SIG} = n_{REST}$  «полезный» сигнал от шпалы миры в первом порядке дифракции,  $\sigma_{CHANN}$  – СКО шумов электронного тракта,  $n_{\Sigma}$  – суммарный сигнал от фона, шпалы миры и дымки атмосферы Земли.

Расчёт сигнала от шпалы миры, выраженного в электронах, будем проводить с использованием приближённого соотношения:

$$n_{RECT} = \left(\frac{d_{LENS}}{2f}\right)^2 \cdot (1-\mu^2) \cdot t_{EXP} \frac{d_y d_{SLIT}}{hc} \Delta\rho_{RECT} \times \int_{\Delta\lambda} E(\lambda) \tau_A(\lambda)^{1/\cos(\theta)} \tau_{LENS}(\lambda) S(\lambda) C_1(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (25)$$

где  $d_{LENS}$  – диаметр входного зрачка объектива,  $f$  – фокусное расстояние объектива,  $\mu$  – коэффициент центрального экранирования объектива,  $t_{EXP}$  – время накопления сигнала,  $d_y$  – размер элемента фотоприёмника (вдоль направления щели),  $d_{SLIT}$  – ширина щели,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\Delta\rho_{RECT}$  – альbedo шпалы миры без учёта фона (под альbedo понимается коэффициент диффузного отражения),  $E(\lambda)$  – спектральная облучённость поверхности Земли [ $Bm/(m^2 \cdot мкм)$ ],  $\tau_A(\lambda)$  – интегральное по оптическому пути спектральное пропускание атмосферы,  $\theta$  – угол визирования,  $\tau_{LENS}(\lambda)$  – интегральный коэффициент пропускания объектива,  $S(\lambda)$  – спектральная квантовая эффективность фотоприёмника,  $C_1(\lambda)$  – спектральная интенсивность «+1» порядка дифракции.

Интегрирование в (25) ведётся по диапазону длин волн  $\Delta\lambda$  для «+1» порядка дифракции, приходящемуся на спектральный канал гиперспектрометра.

Аналогично выражение для суммарного сигнала от шпалы миры, фона и дымки в выбранном спектральном канале имеет вид:

$$n_{\Sigma} = \left(\frac{d_{LENS}}{2f}\right)^2 \cdot (1-\mu^2) \cdot t_{EXP} \frac{d_y d_{SLIT}}{hc} \times \sum_m \int_{\Delta\lambda_m} [(\Delta\rho_{RECT} + \rho_{BCKG}) E(\lambda) + \pi B(\lambda)] \times \tau_A(\lambda)^{1/\cos(\theta)} \tau_{LENS}(\lambda) S(\lambda) C_m(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (26)$$

где  $\rho_{BCKG}$  – альbedo фона без учёта шпалы миры,  $B(\lambda)$  – СПЭЯ дымки [ $Bm/(ср \cdot м^2 \cdot мкм)$ ],  $C_m(\lambda)$  – спектральная интенсивность порядка дифракции.

В формуле (26) суммирование проводится по всем порядкам дифракции  $m$ , а интегрирование – по всем диапазонам длин волн  $\Delta\lambda_m$ , которые попадают на спектральный канал.

#### 5.4. Результаты расчёта прогнозного разрешения

С использованием рассмотренной математической модели, а также исходными параметрами съёмки и значением контраста миры (параграф 4) были проведены расчёты прогнозного разрешения трёхшпальной миры. Результаты расчёта приведены в табл. 1.

Результаты расчёта прогнозного разрешения трёхшпальной миры показывают хорошее соответствие с модельными изображениями трёхшпальных мир (рис.7), где шпалы различаются при  $R=20$  м. Также полученная оценка сигнал/шум хорошо коррелирует с шумами на гиперспектральном изображении (рис. 2, 5).

Табл. 1. Результаты расчёта прогнозного разрешения трёхшпальной миры

$\lambda, нм$	425	500	600	700	800	900
<i>CMV2000</i>						
$\psi_0$	20,2	30,2	29,7	19,4	8,0	2,2
$R_x, м$	19,5	19,5	19,5	19,5	19,8	22,3
$R_y, м$	18,3	18,2	18,2	18,3	19,2	25,0
<i>MT9M413</i>						
$\psi_0$	38,7	51,8	44,3	27,1	12,7	4,4
$R_x, м$	19,9	19,8	19,8	20,0	20,8	24,1
$R_y, м$	19,8	19,8	19,8	19,8	20,3	22,7

#### Заключение

В работе рассмотрена математическая модель космического гиперспектрометра, позволяющая формировать модельное гиперспектральное изображение с учётом входных данных по параметрам предметной плоскости, оптико-электронной части гиперспектрометра, расчётного вектора скорости движения изображения.

Разработанная модель формирования изображения учитывает влияние атмосферы на размытие изображения, а также регистрацию освещённости кадровым матричным фотоприёмником с учётом шумов при накоплении сигнала.

Проведено численное моделирование гиперспектрального изображения с использованием параметров матричных фотоприёмников CMV2000 и MT9M413, а также оценена линейная разрешающая способность гиперспектрометра для заданных условий съёмки с использованием тест-объектов.

С использованием математической модели прогнозного разрешения трёхшпальной миры [25] проведена оценка адекватности полученных результатов. Результаты расчётов показали хорошую сходимость с визуальными оценками разрешения по модельным изображениям трёхшпальных мир.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26).

#### Литература

1. **Остриков, В.Н.** Имитационная оценка потенциальных возможностей гиперспектральной съёмки бортовой аппаратурой малого космического аппарата // В.Н. Остриков, О.В. Плахотников, К.М. Шулика // Механика, управление и информатика (см. в книгах). – 2012. – № 2(8). – С. 21-25.
2. **Хименко, В.И.** Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга // В.И. Хименко, М.Ю. Охтилев, А.А. Ключарев, В.А. Матьяш // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2(87). – С. 2-12.

3. **Козин, И.А.** Формирование и обработка гиперспектральных изображений в оптико-электронных системах дистанционного зондирования Земли // И.А. Козин, Г.Н. Мальцев // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121, № 6. – С. 1005-1019.
4. **Макарецкий, Е.А.** Моделирование процесса формирования гиперспектрального изображения // Е.А. Макарецкий, А.В. Овчинников, А.В. Гублин, С.Л. Погорельский, В.М. Понятский // Распознавание – 2018 (сборник трудов конференции). – 2018. – С. 160-162.
5. **Селин, В.А.** Оценка функциональных ожиданий тематических потребителей от оптических КСДЗ среднего разрешения // В.А. Селин, А.А. Емельянов, О.С. Сизов, К.С. Емельянов, А.В. Борисов // Исследование земли из космоса. – 2019. – № 5. – С. 89-98.
6. **Артюхина, Н.К.** Особенности построения видеоспектрометров дистанционного зондирования земли из космоса // Н.К. Артюхина, М.Н. Котов // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1(1). – С. 56-62.
7. **Mouroulis, P.** Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, Issue 6. – 063001.
8. **Prieto-Blanco, X.** The Offner imaging spectrometer in quadrature / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, H. González-Nuñez, M.D. Mouriz, E.L. Lago, R. de la Fuente // Optics Express. – 2010. – Vol. 18 – P. 12756-12769.
9. **Lee, J.H.** Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, H.-S. Yang, S.-W. Rhee // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12, Issue 4. – P. 262-268.
10. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.И. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
11. **Досколович, Л.Л.** О коррекции эффекта перекрытия дифракционных порядков в спектрометре на основе схемы Оффнера / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 777-781.
12. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
13. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
14. **Карпеев, С.В.** Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, А.Р. Мурдагулов, М.В. Петров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 197-206. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
15. **Подлипов, В.В.** Калибровка изображающего гиперспектрометра / В.В. Подлипов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 869-874. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.
16. **Расторгуев, А.А.** Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 399-405. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.
17. **Расторгуев, А.А.** Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 424-431. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.
18. **Техническая оптика / Г.Шрёдер, Х. Трайбер; пер. с нем. Р.Е. Ильинского.** – М.: Техносфера, 2006. – 258 с.
19. **Проектирование оптических систем / Р. Шеннон, Дж. Вайант; пер. с англ. под ред. И.В. Пейсахсона.** – М.: Мир, 1983. – 432 с.
20. **Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа.** – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
21. **Гужов, В.И.** Дискретизация изображений в реальных системах с помощью обобщённых функций / В.И. Гужов, И.О. Марченко, Д.С. Хайдуков, С.П. Ильиных // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 4(18). – С. 45-52.
22. **CMV2000 Datasheet [Electronical Resource].** – 2019. – URL: <https://ams.com/cmos-imaging-sensors> (request date 26.05.2019).
23. **MT9M413C36STC Datasheet [Electronical Resource].** – 2019. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/97416/MICRON/MT9M413C36STC.html> (request date 26.05.2019).
24. **ENVI [Electronical Resource].** – 2019. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> (request date 26.05.2019).
25. **Батраков, А.С.** Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования / А.С. Батраков, А.Б. Анатолев // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 7. – С. 92-99.

### Сведения об авторах

**Расторгуев Андрей Алексеевич** 1984 года рождения, в 2006 году окончил физический факультет Самарского государственного университета по специальности «Оптика», работает ведущим инженером-конструктором в отделе целевой эффективности и подтверждения ТТХ КК и КС, гиперспектральных комплексов, обработки и взаимодействия с потребителями информации ДЗЗ. С 2016 года обучается в аспирантуре Самарского университета. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, моделирование работы гиперспектральной аппаратуры. E-mail: [goto.anras@gmail.com](mailto:goto.anras@gmail.com).

**Харитонов Сергей Иванович** 1961 года рождения. Доктор физико-математических наук, доцент кафедры наноинженерии, ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонова 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов. E-mail: [prognoz2007@gmail.com](mailto:prognoz2007@gmail.com).

**Казанский Николай Львович** в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 г.), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИРАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Заведующий базовой кафедрой высокопроизводительных вычислений Самарского университета в ИСОИ РАН. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: [kazanskiy@ssau.ru](mailto:kazanskiy@ssau.ru).

*ГРНТИ: 29.31.29*

*Поступила в редакцию 11 октября 2019 г. Окончательный вариант – 07 января 2020 г.*

# Modeling of image formation with a space-borne Offner hyperspectrometer

A.A. Rastorguev<sup>1</sup>, S.I. Kharitonov<sup>2,3</sup>, N.L. Kazanskiy<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company "Rocket and Space Center" Progress", Samara, Russia,

<sup>2</sup>IPSI RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS,  
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

<sup>3</sup>Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, 443086, Samara, Russia

## Abstract

In this paper, we developed a mathematical model of image formation that allows a predictive hyperspectral image to be generated. The model takes into account the formation of an optical image using a matrix photodetector. The paper presents a numerical modeling of hyperspectral image formation and gives estimates of spatial and spectral resolution, as well as analyzing the adequacy of the results.

**Keywords:** spaceborn hyperspectrometer, image formation, Offner scheme, photodetector, resolution, numerical simulation.

**Acknowledgements:** This work was funded by the RF Ministry of Science and Higher Education within the government project of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS (contract N 007-GZ/Ch3363/26).

**Citation:** Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling of image formation with a space-borne Offner hyperspectrometer. *Computer Optics* 2020; 44(1): 12-21. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-644.

## References

- [1] Ostrikov VN, Plakhotnikov OV, Shulika KM. Simulation estimates of possibilities for on-board hyperspectral sensors on small satellites [In Russian]. *Mechanics, management and informatics* (see books) 2012; 2(8): 21-25.
- [2] Khimenko VI, Okhtilev MYu, Klucharev AA, Matiash VA. Informative feature analysis in data processing for aerospace monitoring [In Russian]. *Information and Control Systems* 2017; 2(87): 2-12.
- [3] Kozinov IA, Maltsev GN. Development and processing of hyperspectral images in optical-electronic remote sensing systems. *Optics and spectroscopy* 2016; 121(6): 934-946.
- [4] Makaretsky EA, Ovchinnikov AV, Gublin AV, Pogorelsky SL, Ponyatsky VM. Modeling the process of forming a hyperspectral image [In Russian]. *Recognition – 2018* (conference proceedings) 2018; 160-162.
- [5] Selin VA, Emelyanov AA, Sizov OS, Emelyanov KS, Borisov AV. Evaluation of functional expectations of thematic consumers from optical space remote sensing systems of medium resolution [In Russian]. *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa* 2019; 5: 89-98.
- [6] Artyukhina NK, Kotov MN. Features of construction remote sensing imaging spectrometers from space [In Russian]. *Devices and Methods of Measurements* 2010; 1(1): 56-62.
- [7] Mouroulis P, Sellar RG, Wilson DW. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. *Opt Eng* 2007; 46(6): 063001.
- [8] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, González- Nuñez H, Mouriz MD, Lago EL, R. de la Fuente. The Offner imaging spectrometer in quadrature. *Opt Express* 2010; 18: 12756-12769.
- [9] Lee JH, Jang TS, Yang H-S, Rhee S-W. Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3. *J Opt Soc Korea* 2008; 12(4): 262-268.
- [10] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Karsakov SI, Khonina SN. Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. *Computer Optics* 2014; 38(2): 271-280.
- [11] Doskolovich LL, Bezus EA, Bykov DA. On the compensation of the diffraction orders overlap effect in the Offner spectrometer. *Computer Optics* 2014; 38(4): 777-781.
- [12] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Doskolovich LL, Pavelyev AV. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme. *Computer Optics* 2015; 39(1): 70-76. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
- [13] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
- [14] Karpeev SV, Khonina SN, Murdagulov AR, Petrov MV. Alignment and study of prototypes of the Offner hyperspectrometer. *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 2016; 15(1): 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
- [15] Podlipnov VV, Skidanov RV. Calibration of an imaging hyperspectrometer. *Computer Optics* 2017; 41(6): 869-874. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.
- [16] Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling the illuminance distribution in the detection plane of a spaceborne Offner hyperspectrometer. *Computer Optics* 2017; 41(3): 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.
- [17] Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling of arrangement tolerances for the optical elements in a spaceborne Offner imaging hyperspectrometer. *Computer Optics* 2018; 42(3): 424-431. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.
- [18] Schroeder G, Traiber H. *Technische Optik*. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co KG; 1974.
- [19] Shannon RR, Wyant JC, eds. *Applied optics and optical engineering*. New York: Academic Press; 1983.
- [20] Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*. 4<sup>th</sup> ed. New York: Pearson Education Limited; 2018.
- [21] Guzhov VI, Marchenko IO, Hajdukov DS, Ilynikh SP. Sampling the image in real systems using generalized functions [In Russian]. *Automatics & Software Engineering* 2016; 4(18): 45-52.
- [22] *CMV2000 Datasheet*. 2019. Source: (<https://ams.com/cmos-imaging-sensors>).

- 
- [23] MT9M413C36STC Datasheet. 2019. Source: (<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/97416/MICRON/MT9M413C36STC.html>).
- [24] ENVI. 2019. Source: (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>).

- [25] Batrakov AS, Anatolyev AB. Mathematical model for predicting the linear resolution of spaceborne remote-sensing optoelectronic systems. *J Opt Technol* 2000; 67(7): 680-687.

---

#### *Authors' information*

**Andrey Alekseevich Rastorguev** (b. 1984), in 2006 graduated from Physics department of Samara State University, specializing in Optics. He has been working as a leading design engineer with the *Progress Center* of Target Efficiency and Performance Verification of Space Vehicles, Hyperspectral Complexes, and ERS Data department. Since 2016 he has been studying at a post-graduate course of Samara University. Areas of scientific interests: Earth remote sensing, modeling of hyperspectral equipment. E-mail: [goto.anras@gmail.com](mailto:goto.anras@gmail.com).

**Sergey Ivanovich Kharitonov** (b. 1961) leading researcher of Diffractive Optics laboratory in the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State University (presently, Samara National Research University). 1993 – defended his dissertation “Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation focuser”. 2010 – defended his doctoral thesis on “Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements”. Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. The list of S.I. Kharitonov scientific papers includes 87 articles, 5 patents. E-mail: [prognoz2007@gmail.com](mailto:prognoz2007@gmail.com).

**Nikolay Lvovich Kazanskiy** graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara University. He is the Head of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”, also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara University, holding the chair at the of High-Performance Computing department at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”. He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current re-search interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: [kazanskiy@ssau.ru](mailto:kazanskiy@ssau.ru).

---

*Received October 11, 2019. The final version – January 07, 2020.*

---