

АНАЛИЗ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОСМИЧЕСКОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА, ОСНОВАННОГО НА СХЕМЕ ОФФНЕРА

Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Досколович Л.Л., Павельев А.В.

Институт систем обработки изображений РАН,

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)*

Аннотация

В статье рассмотрено моделирование гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера с дифракционной решёткой, в рамках геометрикооптического подхода. Показано, что при параметрах схемы, характерных для аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, геометрические аберрации являются малыми по сравнению с размерами элементов используемых ПЗС-матриц. Получено интегральное уравнение для восстановления спектральных компонент сигнала при наличии перекрытия спектров различных порядков.

Ключевые слова: гиперспектрометр, схема Оффнера, дифракционная решётка, спектральные компоненты изображения, трассировка лучей.

Введение

Эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) может быть существенно повышена за счёт детального анализа информации на разных длинах волн [1–2]. Для этого разрабатываются малогабаритные изображающие гиперспектрометры, имеющие высокое пространственное и спектральное разрешение. До появления гиперспектрометров спектры отражения и излучения поверхности Земли мало использовались в качестве идентификационных признаков, хотя изучались десятки лет и были хорошо известны. Это было связано с тем, что авиационные спектрометры имели низкое геометрическое разрешение, давали информацию только вдоль линии полёта и позволяли судить о спектральных свойствах лишь достаточно протяжённых объектов [3–5]. Появление гиперспектрометров связано с развитием новых технологий производства высокоразрешающих матричных приёмников и полихроматоров. В состав гиперспектрометров входят система формирования изображения наблюдаемой области пространства и изображающий спектрометр, который разлагает принятое электромагнитное излучение в набор спектральных полос. В результате гиперспектральной съёмки формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок изображения, «пиксел», характеризуется собственным спектром. Такое изображение носит название «гиперспектрального куба» информации [6], два измерения которого соответствуют пространственному изображению местности, а третьё – характеризует спектральные свойства изображения. Спектральное разрешение современных гиперспектрометров достигает 1,8–2,0 нм [7] и обеспечивает построение спектральных характеристик подстилающей поверхности, определяемой мгновенным полем зрения прибора.

Для решения конкретных задач используются гиперспектрометры различных типов – дисперсионные, фильтровые и интерференционные. В качестве диспергирующего элемента в спектрометре может использоваться как призма [8, 9], так и дифракционная

решётка [10]. Очевидным преимуществом дифракционной решётки по сравнению с призмой является компактность. Изображающие спектрометры, содержащие в качестве диспергирующего элемента дифракционную решётку, как правило, основаны на конфигурации Оффнера [11–13]. В работе рассмотрено моделирование гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики, проведено сравнение величины геометрических аберраций и характерного размера ячеек ПЗС-матрицы, получено интегральное уравнение для восстановления спектра излучения в случае наложения в фокальной плоскости спектров различных порядков. Для облегчения понимания мы повторили часть предварительных материалов, представленных в работе [10]. В [10] изложен общий подход к расчёту оптических схем, содержащих дифракционные оптические элементы на криволинейной поверхности. В данной работе общий подход адаптирован для расчёта и моделирования оптической схемы с дифракционной решёткой на сферической поверхности.

1. Постановка задачи

Для того чтобы сформировать гиперспектральный куб [6], изображения, полученные с помощью гиперспектральной аппаратуры, необходимо подвергнуть процедурам обработки и фильтрации. Для этого необходимо знание аппаратных функций различного уровня, в частности, функции рассеяния точки. В случае гиперспектральной аппаратуры точка на изображении превращается в линию, каждая точка которой содержит информацию о спектральной характеристике.

Для того чтобы рассчитать распределение интенсивности в области фокусировки, необходимо найти ход лучей в оптической системе. Гиперспектрометр состоит из телескопической части и гиперспектрального блока (рис. 1). Методы расчёта телескопической части описаны в работе [14].

Гиперспектральный блок аппарата ДЗЗ, основанного на схеме Оффнера, состоит из трёх зеркал, входной щели и детектора в плоскости изображения.

Входная щель расположена таким образом, что плоскость, проходящая через неё и центры кривизны зеркал, перпендикулярна к оси z и перпендикулярна плоскости рисунка. Первое и третье зеркала имеют радиус кривизны R , второе зеркало имеет радиус кривизны $R/2$. Иногда конструктивно первое и третье зеркала выполнены в виде одного зеркала (рис. 1). Луч выходит из источника падает на первое зеркало $M1$, отражается и падает на дифракционную решётку, расположенную на втором выпуклом сферическом зеркале $M2$. Далее, отражаясь от третьего зеркала $M3$, приходит в плоскость регистрации. Моделирование описанного гиперспектрального блока является предметом настоящей работы.

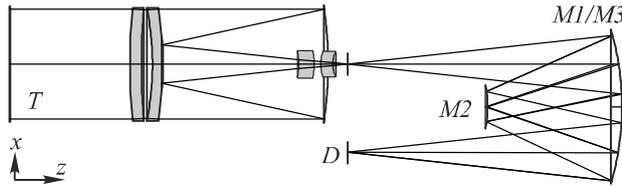


Рис. 1. Ход лучей в оптической системе

2. Математический аппарат, используемый при моделировании работы гиперспектрометра в рамках геометрической оптики

Пересечение луча с первой сферой

Рассмотрим отражение луча от сферической поверхности. Пусть вектор \mathbf{r}_0 определяет положение точки на щели. Уравнение исходящего луча имеет вид:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{s}_0 l, \quad (1)$$

где \mathbf{s}_0 – единичный вектор луча, l – длина пути вдоль луча. Точка пересечения луча с первой сферой радиуса определяется из квадратного уравнения:

$$(\mathbf{r}_0 + \mathbf{s}_0 l_0)^2 - R^2 = 0. \quad (2)$$

Решая его, получаем положительный корень:

$$l_0 = \sqrt{(\mathbf{r}_0, \mathbf{s}_0)^2 - (\mathbf{r}_0)^2 + R^2} - (\mathbf{r}_0, \mathbf{s}_0). \quad (3)$$

Тогда точка пересечения луча с первой сферой имеет вид:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_0 + \mathbf{s}_0 l_0. \quad (4)$$

Закон отражения в векторном виде можно представить следующим образом:

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_0 - 2\mathbf{n}(\mathbf{s}_0, \mathbf{n}), \quad (5)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к сфере в точке падения луча.

Пересечение луча со второй сферой

После отражения от первой сферы луч падает на вторую сферу и отражается от неё. Точка пересечения луча со второй сферой, на которую нанесена дифракционная решётка, может быть получена в виде:

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1 + \mathbf{s}_1 l_1, \quad (6)$$

где

$$l_1 = -\sqrt{(\mathbf{r}_1, \mathbf{s}_1)^2 - (\mathbf{r}_1)^2 + (R/2)^2} - (\mathbf{r}_1, \mathbf{s}_1). \quad (7)$$

Пусть \mathbf{t} – единичный вектор вдоль направления штрихов дифракционной решётки, \mathbf{n} – вектор, перпендикулярный плоскости решётки, \mathbf{b} – перпендикулярный вектору направления штрихов. Разложение падающего вектора \mathbf{s}_1 в (6) по трём базисным векторам, определённым в каждой конкретной точке сферы, имеет вид:

$$\mathbf{s}_1 = s_t \mathbf{t} + s_b \mathbf{b} + s_n \mathbf{n}. \quad (8)$$

Направляющий вектор луча, отражённого от решётки, имеет вид:

$$\mathbf{s}_m = s_t \mathbf{t} + \left(s_b + \frac{\lambda}{d} m\right) \mathbf{b} - \sqrt{1 - s_t^2 - \left(s_b + \frac{\lambda}{d} m\right)^2} \mathbf{n}, \quad (9)$$

где λ – длина волны, m – порядок дифракционного максимума, d – период решётки.

Вектора локального базиса $(\mathbf{t}, \mathbf{b}, \mathbf{n})$ в точке $\mathbf{r}_2 = (r_x, r_y, r_z)^T$ в (6) несложно получить в виде:

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_2 = (r_x, r_y, r_z)^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{t} = [\mathbf{n} \times \mathbf{x}] = (0, r_z, -r_y)^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{b} = [\mathbf{n} \times [\mathbf{n} \times \mathbf{x}]] = (-r_y^2 - r_z^2, r_x r_y, r_x r_z)^T, \quad (12)$$

где $\mathbf{x} = (1, 0, 0)^T$ – вектор, перпендикулярный проекции штрихов дифракционной решётки на плоскость регистратора. Для получения ортонормированного базиса нормируем полученные вектора. Тогда компоненты направляющего вектора падающего луча на вторую сферическую поверхность в новом базисе примут вид:

$$s_t = (\mathbf{s}_1, \mathbf{t}), \quad s_b = (\mathbf{s}_1, \mathbf{b}), \quad s_n = (\mathbf{s}_1, \mathbf{n}). \quad (13)$$

Имея коэффициенты разложения (13), представим направляющий вектор отражённого луча (9) в виде:

$$\mathbf{s}_m = (\mathbf{s}_1, \mathbf{t}) \mathbf{t} + (\mathbf{s}_1, \mathbf{b}) \mathbf{b} + \frac{\lambda}{d} m \mathbf{b} - \sqrt{1 - ((\mathbf{s}_1, \mathbf{t}))^2 - (\mathbf{s}_1, \mathbf{b})^2 - 2(\mathbf{s}_1, \mathbf{b}) \frac{\lambda}{d} m - \frac{\lambda^2}{d^2} m^2} \mathbf{n}. \quad (14)$$

Согласно (14), направление отражённого луча зависит от номера m дифракционного порядка, что и используется для спектрального анализа данных в гиперспектральной аппаратуре.

Пересечение луча с третьей сферой

Уравнение отражённого от второй сферы луча имеет вид:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 + \mathbf{s}_m l. \quad (15)$$

Аналогично с пунктом 1, получаем точку пересечения луча с третьим зеркалом:

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_2 + \mathbf{s}_m l_2, \quad (16)$$

где

$$l_2 = \sqrt{(\mathbf{r}_2, \mathbf{s}_m)^2 - (\mathbf{r}_2)^2 + R^2} - (\mathbf{r}_2, \mathbf{s}_m). \quad (17)$$

При этом направляющий вектор луча, отражённого от большей сферы, согласно (5), имеет вид:

$$\mathbf{s}_3 = \mathbf{s}_m - 2\mathbf{n}(\mathbf{s}_m, \mathbf{n}),$$

где \mathbf{n} – вектор нормали к сфере в точке пересечения луча.

Пересечение луча с выходной плоскостью

Уравнение отражённого луча имеет вид:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_3 + \mathbf{s}_3 l. \tag{18}$$

Выражение для точки пересечения этого луча с плоскостью приёмника представляется в виде:

$$\mathbf{r}_{\text{out}} = \mathbf{r}_3 + \mathbf{s}_3 l_3, \tag{19}$$

где

$$l_3 = -\frac{(\mathbf{r}_3, \mathbf{z})}{(\mathbf{s}_3, \mathbf{z})}. \tag{20}$$

Вычисление освещённости в рамках геометрикооптического подхода

Распределение освещённости в плоскости детектора, формируемой точкой щели, можно представить в виде [15]:

$$E(x, y) = \int_s I(\theta, \varphi; u, v) \delta(x - \tilde{x}(\theta, \varphi), y - \tilde{y}(\theta, \varphi)) \sin(\theta) d\theta d\varphi, \tag{21}$$

где (x, y) – координаты в плоскости детектора, $\delta(x, y)$ – дельта-функция Дирака, функции $\tilde{x}(\theta, \varphi)$ и $\tilde{y}(\theta, \varphi)$ определяют координаты точки прихода луча в плоскость изображения в зависимости от сферических координат (θ, φ) исходящего луча из точки (u, v) щели. Интегрирование производится по сфере S единичного радиуса с центром в точке (u, v) . Функция $I(\theta, \varphi; u, v)$ соответствует интенсивности точки щели. При расчётах дельта-функция Дирака заменяется следующей аппроксимацией [16]:

$$\delta(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right]. \tag{22}$$

Для расчёта освещённости с учётом нескольких дифракционных порядков применяем следующую модификацию формулы (21):

$$E(x, y) = \sum_m C_m \int_s I(\theta, \varphi; u, v) \times \delta(x - \tilde{x}(\theta, \varphi), y - \tilde{y}(\theta, \varphi)) \sin(\theta) d\theta d\varphi, \tag{23}$$

где C_m – интенсивности дифракционных порядков решётки.

3. Расчёт формирования изображения в схеме Оффнера с дифракционной решёткой. Моделирование искажений

Схема Оффнера, использованная для моделирования, приведена на рис. 1. В левой части схемы располагается телескопический блок с фокусным расстоянием 300 мм. В правой части располагается блок с двумя сферическими зеркалами $M1$ и $M2$, имеющими радиусы $-159,6$ мм и $-80,6$ мм соответственно. На зеркало $M2$ нанесена дифракционная решётка с частотой штрихов 30 линий на 1 мм. Изображение регистрируется в плоскости детектора D . Параметры, принятые при данном моделировании, соответствуют

планируемым параметрам гиперспектрального блока проектируемого ИСОИ РАН совместно с АО «РКЦ-Прогресс» малого космического аппарата ДЗЗ.

На рис. 2 приведены результаты моделирования геометрических aberrаций [17] такой схемы с использованием программного продукта, реализующего математическую модель, предложенную в п. 2 данной статьи.

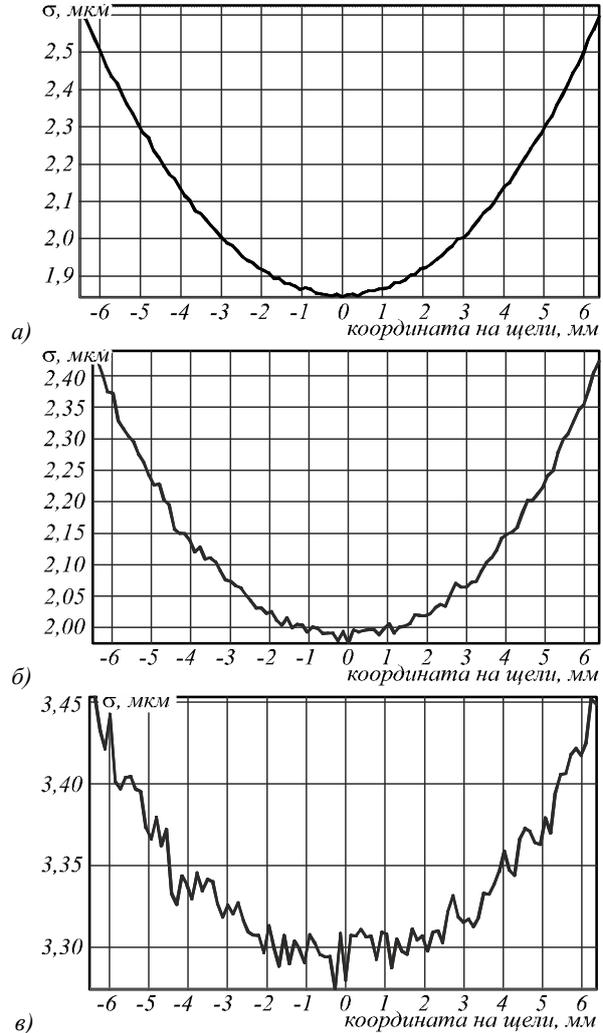


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения точки изображения от координаты на щели: для нулевого дифракционного порядка (а); для первого дифракционного порядка (б); для второго дифракционного порядка (в)

Графики на рис. 2 получены для щели длиной 12 мм, расположенной на расстоянии 25 мм от оси симметрии полусфер. Щель сонаправлена со штрихами дифракционной решётки. По оси ординат откладывается координата точки на щели, по оси абсцисс – среднеквадратичное отклонение координаты в плоскости приёмника от параксиального изображения точки щели. Угол раствора конуса лучей, выходящих из точки, расположенной на щели, полагался равным 15° .

Графики на рис. 2 соответствуют нулевому, первому и второму порядкам дифракции, наблюдаемым на расстояниях 25 мм, 23,31 мм и 21,61 мм соответственно. Негладкий характер графиков обусловлен случайным алгоритмом генерации лучей для трассировки

ки, обеспечивающим равномерность распределения лучей по площади сферы.

Как видно из приведённых графиков, среднеквадратичное отклонение лучей (геометрические аберрации) не превышает 3,5 мкм, что в несколько раз меньше линейного размера элемента чувствительной матрицы, который для подобных аппаратов составляет 10–13 мкм [18]. Это означает, что в рамках геометрической оптики схема Оффнера при вышеуказанных параметрах имеет аберрации, которые малы по сравнению с размером ячейки ПЗС-матрицы.

4. Моделирование формирования изображения с учётом дифракционных порядков

В предыдущем разделе было получено, что аберрации, возникающие в схеме Оффнера, малы, и поэтому данную систему можно считать дифракционно-ограниченной. Рассмотрим простейшую модель формирования изображений с учётом дифракционных порядков. Рассмотрим одну точку щели с координатами (u, v) . В плоскости регистратора эта точка в каждом порядке дифракции преобразуется в линию (спектр) с распределением освещённости:

$$I_m(x, y, u, v) = I_0(u, v) \Phi_m(x - u - a(\lambda, m), y - v), \tag{24}$$

где $I_0(u, v)$ – интенсивность точки щели с координатами (u, v) , m – номер порядка дифракции, $\Phi_m(x, y)$ – функция рассеяния точки, $a(\lambda, m)$ – смещение изображения в зависимости от номера порядка и длины волны. Изображения различных порядков в плоскости регистратора накладываются друг на друга, и в результате одна точка щели формирует в плоскости регистратора распределение освещённости:

$$I(x, y, u, v) = \sum_m I_0(u, v) C_m \times \Phi_m(x - u - a(\lambda, m), y - v), \tag{25}$$

где коэффициенты C_m соответствуют интенсивностям дифракционных порядков и зависят от длины волны. Методы расчёта коэффициентов C_m описаны в работе [19].

Приближённое выражение для функции $a(\lambda, m)$ имеет вид:

$$a(\lambda, m) = \alpha \lambda m, \tag{26}$$

где α – коэффициент, определяемый периодом дифракционной решётки и параметрами оптической схемы.

Если на входе гиперспектрометра имеем изображение, то в плоскости изображения формируется распределение освещённости вида:

$$I(x, y) = \sum_m \int I_0(\lambda, u, v) C_m \Phi_m(x - u - \alpha \lambda m, y - v) du dv d\lambda. \tag{27}$$

В случае, когда входная щель вырезает из входного изображения одну линию, распределение (27) принимает вид:

$$I(x, y) = \sum_m \int_{-L/2}^{L/2} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_0(\lambda, v) C_m \times \Phi_m(x - \alpha \lambda m, y - v) dv d\lambda. \tag{28}$$

При этом область, занимаемая изображением в плоскости регистратора, имеет вид:

$$x \in [-\alpha M_{max} \lambda_{max}, -\alpha \lambda_{min}] \cup [\alpha \lambda_{max}, \alpha M_{max} \lambda_{max}], \tag{29}$$

$$y \in [-L/2, L/2],$$

где λ_{min} , λ_{max} – минимальная и максимальная длина волны, M_{max} – максимальный номер рассматриваемого порядка дифракции.

Рассмотрим случай идеальной оптической системы, для которой точка в окрестности щели переходит в точку в плоскости регистратора. Функция рассеяния точки в этом случае является дельта-функцией:

$$\Phi_m(x, y) = \delta(x, y). \tag{30}$$

При условии (30) выражение (28) принимает вид:

$$I(x, y) = \sum_m \int_{-L/2}^{L/2} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_0(\lambda, v) C_m \times \delta(x - \alpha \lambda m, y - v) dv d\lambda. \tag{31}$$

Вычисляя интеграл (31) с учётом свойств дельта – функции, получим выражение для освещённости в области регистратора в виде:

$$I(x, y) = \sum_{m \neq 0} \frac{C_m}{\alpha m} I_0\left(\frac{x}{\alpha m}, y\right). \tag{32}$$

Отметим, что полученное выражение (32) аналогично выражению, полученному в работе [20]. При учёте только первого и второго порядков дифракции выражение для освещённости (32) принимает вид:

$$I(x, y) = C_1 I_0\left(\frac{x}{\alpha}, y\right) + C_2 I_0\left(\frac{x}{2\alpha}, y\right). \tag{33}$$

При этом первый и второй порядки занимают области:

$$\alpha \lambda_{min} < x < \alpha \lambda_{max}, \quad 2\alpha \lambda_{min} < x < 2\alpha \lambda_{max}, \tag{34}$$

а перекрытие порядков происходит при $2\alpha \lambda_{min} < x < \alpha \lambda_{max}$.

5. Коррекция гиперспектрального изображения с учётом дифракционных порядков

В работе [21] предложено для компенсации эффекта наложения порядков использовать специальные спектральные фильтры. Однако эти фильтры сложны для изготовления. В работе [20] был рассмотрен алгоритм восстановления гиперспектрального изображения с учётом наложения различных порядков дифракции, позволяющий исключить указанные фильтры. В данном пункте рассмотрим алгоритм, учитывающий искажения оптической системы, в том числе конечные размеры функции рассеяния точки [14].

Интенсивность в плоскости регистратора имеет вид (28). Сделаем замену переменных $\lambda m = \xi$. В случае, когда функция рассеяния точки не зависит от длины волны и порядка дифракции, получим:

$$I(x, y) = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} J_0(\xi) \Phi(x - \alpha\xi, y - \nu) dv d\xi, \quad (35)$$

где

$$J_0(\xi) = \sum_{m \neq 0} \frac{C^m}{m} I_0\left(\frac{\xi}{m}, \nu\right). \quad (36)$$

Функция $J_0(\xi)$ может быть определена из решения интегрального уравнения (35). Далее, для восстановления $I_0(\lambda, \nu)$ можно использовать алгоритм, рассмотренный в работе [20].

Заключение

В работе на основе геометрооптического подхода получены конкретные формулы для моделирования гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера с дифракционной решёткой. Показано, что при геометрических параметрах спектрометра, характерных для космических аппаратов ДЗЗ, геометрические aberrации меньше, чем размеры пиксела используемых ПЗС-матриц. Получено интегральное уравнение для восстановления спектральных компонент сигнала с учётом перекрытия спектров различных порядков.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-07-12181-офи-м и № 14-07-97008-р).

Литература

1. **Журавель, Ю.Н.** Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды / Ю.Н. Журавель, А.А. Федосеев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 471-476.
2. **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 – P. 063001-1-9.
3. **Rickard, L.J.** HYDICE: An airborne system for hyperspectral imaging / L.J. Rickard [et al.] // Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. – 1993. – P. 173-179.
4. **Oskotsky, M.** Airborne hyperspectral imaging system / M. Oskotsky, M.J. Russo, Jr. // Patent No. US 7944559 B2. Date of Publication 17.05.2011.
5. **Prieto-Blanco, X.** Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers / X. Prieto-Blanco, H. González-Núñez, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28, Issue 11. – P. 2332-2339.
6. **Зимичев, Е.А.** Пространственная классификация гиперспектральных изображений с использованием метода кластеризации k-means++ / Е.А. Зимичев, Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 281-286.
7. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37, Issue 31. – P. 7200-7208.
8. **Казанский, Н.Л.** Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, Ю.С. Стрелков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 256-270.

9. **Казанский, Н.Л.** Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами с использованием векторных Бесселевых пучков / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 770-776.
10. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, А.В. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
11. **Chrip, M.P.** Convex diffraction grating imaging spectrometer // Patent No. US 5880834 A. Date of Publication 9.03.1999.
12. **Reininger, F.M.** Imaging spectrometer/camera having convex grating // Patent No. US 6100974 A. Date of Publication 8.08.2000.
13. **Offner, A.** An :1.0 Camera for Astronomical Spectroscopy / A. Offner, W.B. Decker // Journal of the Optical Society of America. – 1951. – Vol. 41. – P. 169-169.
14. **Казанский, Н.Л.** Математическое моделирование оптических систем / Н.Л. Казанский. – Самара: СГАУ, 2005. – 240 с.
15. **Doskolovich, L.L.** Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Journal of Modern Optics. – 2010. – Vol. 57(7). – P. 536-544.
16. **Владимиров, В.С.** Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1981. – 512 с.
17. **González-Núñez, H.** Pupil aberrations in Offner spectrometers / H. González-Núñez, X. Prieto-Blanco, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29, Issue 4. – P. 442-449.
18. **Lee, J.H.** A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3 / Jun Ho Lee, Kyung In Kang, Jong Ho Park // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, Issue 14. – P. 3935-3946.
19. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
20. **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.
21. **Norton, A.** Diffraction order sorting filter for optical metrology / A. Norton, H. Tuijje, F. Stanke // Patent No. US 8107073 B2. Date of Publication 31.01.2012.

References

1. **Zhuravel, Yu.N.** The features of hyperspectral remote sensing data processing under environment monitoring task solution / Yu.N. Zhuravel, A.A. Fedoseev // Computer Optics. – 2013. – Vol. 37(4). – P. 471-476.
2. **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 – P. 063001-1-9.
3. **Rickard, L.J.** HYDICE: An airborne system for hyperspectral imaging / L.J. Rickard [et al.] // Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. – 1993. – P. 173-179.
4. **Oskotsky, M.** Airborne hyperspectral imaging system / M. Oskotsky, M.J. Russo, Jr. // Patent No. US 7944559 B2. Date of Publication 17.05.2011.

5. **Prieto-Blanco, X.** Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers / X. Prieto-Blanco, H. González-Núñez, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28, Issue 11. – P. 2332-2339.
6. **Zimichev, E.A.** Spectral-spatial classification with k-means++ particional clustering / E.A. Zimichev, N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 281-286.
7. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37, Issue 31. – P. 7200-7208.
8. **Kazanskiy, N.L.** Simulation of hyperspectrometer on spectral linear variable filters / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, Yu.S. Strelkov // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 256-270.
9. **Kazanskiy, N.L.** Simulation of a hyperspectrometer based on linear spectral filters using vector bessel beams / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38 (4). – P. 770-776.
10. **Kazanskiy, N.L.** Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, A.V. Karsakov, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38 (2). – P. 271-280.
11. **Chrip, M.P.** Convex diffraction grating imaging spectrometer // Patent No. US 5880834 A. Date of Publication 9.03.1999.
12. **Reininger, F.M.** Imaging spectrometer/camera having convex grating // Patent No. US 6100974 A. Date of Publication 8.08.2000.
13. **Offner, A.** An $\lambda/10$ Camera for Astronomical Spectroscopy / A. Offner, W.B. Decker // Journal of the Optical Society of America. – 1951. – Vol. 41. – P. 169-169.
14. **Kazanskiy, N.L.** Mathematical modeling of optical systems / N.L. Kazanskiy. – Samara: Samara State Aerospace University, 2005. – 240 p.
15. **Doskolovich, L.L.** Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Journal of Modern Optics. – 2010. – Vol. 57(7). – P. 536-544.
16. **Vladimirov, V.S.** Mathematical physics equations / V.S. Vladimirov. – Moscow: "Nauka" Publisher, 1981. – 512 p.
17. **González-Núñez, H.** Pupil aberrations in Offner spectrometers / H. González-Núñez, X. Prieto-Blanco, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29, Issue 4. – P. 442-449.
18. **Lee, J.H.** A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3 / Jun Ho Lee, Kyung In Kang, Jong Ho Park // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, Issue 14. – P. 3935-3946.
19. **Diffraction computers optics** / D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, S.N. Khonina. – Ed. by V.A. Soifer. – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2007. – 736 p.
20. **Doskolovich, L.L.** On the compensation of the diffraction orders overlap effect in the Offner spectrometer / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 777-781.
21. **Norton, A.** Diffraction order sorting filter for optical metrology / A. Norton, H. Tuijje, F. Stanke // Patent No. US 8107073 B2. Date of Publication 31.01.2012.

MODELING THE PERFORMANCE OF A SPACEBORNE HYPERSPECTROMETER BASED ON THE OFFNER SCHEME

*N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, A.V. Pavelyev
Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

This article deals with modeling of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. We show that at a certain set of parameters, the geometric aberrations are small compared with the size of a conventional CCD matrix sensor. An integral equation for the reconstruction of spectral components of the signal under the overlapping of spectral orders is derived.

Keywords: hyperspectrometer, Offner scheme, dispersing element, spectral components of an image, ray tracing.

Сведения об авторах

Казанский Николай Львович, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает заместителем директора по научной работе и заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли в СГАУ, заведующий базовой (СГАУ в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ *SPIE* и *IAPR*. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 240 статей, 10 монографий, 46 авторских свидетельств и патентов.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm> .

E-mail: kazansky@smr.ru .

Nikolay Lvovich Kazanskiy (b. 1958) graduated with honours (1981) from S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara State

Aerospace University. He is the vice-director for research and the head of Diffractive Optics laboratory at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. Leading researcher at the Breakthrough Technologies for Earth's Remote Sensing laboratory in S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University), holding the chair of SSAU's base sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a SPIE- and IAPR-member. He is co-author of 240 scientific papers, 7 monographs, and 35 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Харитонов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли в СГАУ, ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений 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.

Sergey Ivanovich Kharitonov, leading researcher of Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS, leading researcher at the Breakthrough Technologies for Earth's Remote Sensing laboratory in S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University). Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State 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 scientific papers S.I. Kharitonov's 87 articles, 5 patents.

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва, СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает главным научным сотрудником лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ и ведущим научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли СГАУ. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники.

E-mail: leonid@smr.ru.

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honours (1989) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara State Aerospace University, SSAU), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degree from Samara State Aerospace University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS, professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department, the senior researcher at the Breakthrough Technologies for Earth's Remote Sensing laboratory at SSAU. His leading research interests include diffractive optics, laser information technologies, nanophotonics.

Павельев Андрей Владимирович, студент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), техник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: 44Dragon44@rambler.ru.

Andrei Vladimirovich Pavelev, student of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University), technician of Diffractive Optics laboratory, IPSI RAS. Area of research: diffractive optics.

Поступила в редакцию 14 декабря 2014 г.