

# ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ОФФНЕРА

А.Д. Головин, А.В. Дёмин

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Проведено исследование современной гиперспектральной системы аэрокосмического базирования, основанной на схеме Оффнера, достоинством которой является компактность при сохранении высоких оптических характеристик. Составлен алгоритм, позволяющий подобрать наиболее эффективные конструктивные параметры; представлена принципиальная конструкция и имитационная модель многоканального гиперспектрометра.

**Ключевые слова:** анастигмат Оффнера, гиперспектрометр, многоканальная система, выпуклая дифракционная решётка, дистанционное зондирование Земли.

**Цитирование:** Головин, А.Д. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера / А.Д. Головин, А.В. Дёмин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521-528. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.

### Введение

В настоящее время со стороны различных ведомств растёт спрос на данные космических наблюдений, прежде всего на снимки интересующих объектов и районов земной поверхности. Наблюдается быстрый рост объёма продаж на международном рынке данных дистанционного зондирования Земли из космоса, а ведущие космические державы проводят дистанционное зондирование различных районов земной поверхности в коммерческих целях [1].

Очевидно, что при разработке высокоинформативных бортовых систем наблюдения нового поколения необходимо ориентироваться на современные оптические технологии и новые методы решения задач распознавания. Переход к гиперспектральным изображениям исследуемых сцен в бортовых ОЭС и к распознаванию по спектрально-топологическим образам позволяет с помощью малых космических аппаратов (КА) наблюдения решать многие из тех задач, которые прежде решались тяжёлыми КА с крупногабаритными панхроматическими оптическими системами [2].

Основной идеей гиперспектральных систем является концепция спектральной сигнатуры, т.е. для любого заданного материала на основе присущей физической структуры и химического состава количество электромагнитного излучения, которое отражается, излучается, передаётся или поглощается им, изменяется в зависимости от длины волны излучения.

Из собранных данных создаётся «куб данных», или «кубическая модель изображения», которая отображает объекты и информацию, не доступную для обычных мультиспектральных сканеров. Как правило, для сбора гиперкуба исследуемая сцена сканируется вдоль направления движения платформы, а вторая размерность детектора одновременно собирает всю спектральную информацию [3]. Основным преимуществом такого режима является синхронность при сборе линейно диспергированного спектра без необходимости для постобработки, за исключением коррекции атмосферных искажений.

Среди всех возможных схем построения гиперспектрометров схема Оффнера является наиболее перспективной из-за своей простоты, малых габаритов и высоких оптических показателей. В данном исследовании описана эволюция развития этой схемы и детально рассмотрено, за счёт каких модификаций возможно достичь хорошего качества изображения на сравнительно широком спектральном диапазоне при сохранении компактных размеров гиперспектрометра [4].

### 1. Зеркальный анастигмат Оффнера

Зеркальная система Оффнера – это полностью отражающая телецентрическая система для получения изображения внеосевых объектов. Она была разработана Эйбом Оффнером и работает как реле проекции маски выравнивания на цель для проекционной печати интегральных схем.

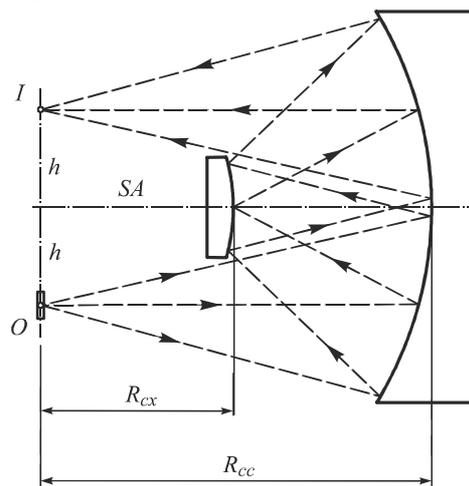


Рис. 1. Зеркальная система Оффнера

Зеркала расположены с центром кривизны в точке P и содержат внеосевые сопряжённые области с центрами в точках O и I (рис. 1). Точки O и I находятся на противоположных сторонах от оптической оси SA на расстоянии H. Вогнутое зеркало образует изображение I объекта O. Выпуклое зеркало образует мнимое

изображение точки I в точке O, которое отражается вогнутым зеркалом. Если радиус вогнутого зеркала в два раза больше радиуса выпуклого зеркала, то алгебраическая сумма оптических сил отражающих поверхностей обращается в ноль, поскольку от вогнутого зеркала происходит два отражения.

После этого в системе корректируются все аберрации Зейделя, остаётся существенной только кривизна поля пятого порядка, которая корректируется увеличением радиуса выпуклого зеркала согласно условию Петцваля. Система на рис. 1 становится афокальной на высоте  $h$ , в результате чего ошибки фокусировки или положений продольных сопряжений не влияют на увеличение системы [5, 6].

Эта комбинация свободна от сферической аберрации, комы и дисторсии, и, когда алгебраическая сумма степеней отражающих поверхностей зеркал обращается в ноль, полученное изображение будет свободно от астигматизма третьего порядка и кривизны поля. Данная система не зависит от спектральной области, используемой при формировании изображения, и контрастность в ней равномерно высокая и в значительной степени постоянная по всей области поля.

Для работы в качестве дисперсионного спектрометра второе выпуклое зеркало в проекционной системе Оффнера было заменено на выпуклую дифракционную решётку, штрихи которой параллельны входной щели. Обычно в подобных схемах увеличение размера спектрометра для заданного размера щели уменьшает угол наклона поля, что приводит к снижению полевых аберраций, таких как астигматизм. М.П. Крипом было предложено заменить первое вогнутое зеркало на два отдельных  $Z_1$  и  $Z_2$ , расположив все сферические элементы на соответствующих кругах Роуланда, которые имеют пересечения в едином общем центре кривизны и в области мнимого изображения дифракционной решётки. Центры кривизны зеркал и решётки, фокальная плоскость и центр входной щели расположены в одной плоскости. Радиусы кривизны зеркал  $Z_1$  и  $Z_2$  выбраны независимо друг от друга и равны  $R_1 = 2R_p \cos(\alpha/2)$  и  $R_2 = 2R_p \cos(\beta/2)$  соответственно, где  $R_p$  – радиус дифракционной решётки, а  $\alpha$  и  $\beta$  являются углами между падающими и отражёнными лучами в полюсах вогнутых зеркал [7].

С учётом данных модификаций исправляются аберрации дефокусировки, астигматизма и комы без необходимости увеличения размера спектрометра для данного размера входной щели. Таким образом, сохраняется компактный размер спектрометра, что было труднодостижимо у обычных спектрометров, достигая при этом хорошего качества пространственных и спектральных изображений на фокальной плоскости детектора.

## 2. Многоканальный гиперспектрометр

В спектрометре нового поколения целесообразно использовать профилированную решётку с малым углом блеска, т.к. она обладает свойством высокой

концентрации энергии в определённом порядке спектра (до 90 %). Такая решётка не может быть получена нарезкой на делительной машине, поскольку угол инструмента не может изменяться непрерывно в течение каждого паза [8]. Метод электронно-лучевой литографии предлагает сравнительно новый способ изготовления решёток на выпуклых поверхностях, позволяя контролировать форму канавки для обеспечения заданной кривой дифракционной эффективности, и проектировать мультипанельные решётки с произвольными формой, интервалом и количеством канавок. При проектировании с одинаковой лёгкостью может быть использовано несколько областей блеска с полной гибкостью в их формообразовании [9–11].

Изготовление таких решёток делает возможным создание многоканального гиперспектрометра на основе приведённой выше схемы. Он включает в себя две и более входных щели или другие источники света, по одному для каждого входного канала. Две входных щели пропускают свет от двух входных каналов соответственно в спектрометр. Свет из двух каналов отражается первым вогнутым зеркалом на выпуклую решётку, которая рассеивает свет на два соответствующих спектра. Отражаясь от второго вогнутого зеркала, спектры поступают на датчик изображения. Входные щели смещены на оси Y по отношению друг к другу. В результате этого смещения спектры на датчике изображения расположены раздельно по отношению друг к другу так, что по меньшей мере соответствующие части двух спектров не накладываются друг на друга и по крайней мере части этих двух спектров могут быть отдельно отображены с помощью датчика изображения.

Входные щели также смещены по горизонтали на оси X по отношению друг к другу. Как показано на рис. 2, это смещение приводит к тому, что свет от двух входных каналов падает на выпуклую дифракционную решётку под различными соответствующими углами падения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Эти различные углы падения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  приводят к тому, что разные длины волн света будут дифрагировать на разных углах дифракции  $\alpha'$  от дифракционной решётки в соответствии с формулой дифракционной решётки [12]:

$$\sin \alpha + \sin \alpha' = k\lambda m, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – это угол падения,  $\alpha'$  – угол дифракции для максимального порядка  $k$ ,  $\lambda$  – длина волны дифрагированного луча и  $m$  число канавок на единицу длины, ( $m = 1/d$ , где  $d$  – расстояние между соседними канавками). Из этого следует, что длинные волны дифрагируют при относительно малых углах, таких как  $\alpha'_1$ , а короткие длины волн дифрагируют при относительно больших углах, таких как  $\alpha'_2$ . Отражение света от каждой канавки создаёт отдельный световой путь. Если два параллельных пути отличаются по длине на целое, кратное длине волны, усиливающая интерференция усиливает свет этой длины волны, а ослабляющая интерференция, как правило, отменяет свет других длин волн. Таким образом, лучи парал-

лельных световых путей содержат главным образом свет одной длины волны. Пути, отражённые под другими углами, содержат свет в первую очередь других соответствующих длин волн. Свет из первого входного канала, который дифрагировал на каждом угле  $\alpha'$ , имеет большую длину волны, чем свет, прошедший во второй входной канал и дифрагированный под тем же углом  $\alpha'$ .

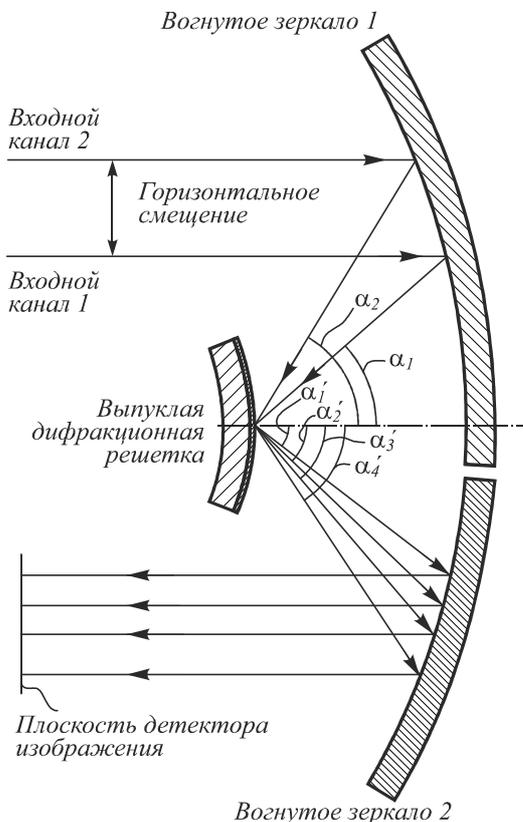


Рис. 2. Формирование изображения спектров. Вид в поперечном сечении части гиперспектрометра

Таким образом, как показано на рис. 2, на один дисперсионный спектр приходится бесконечное число углов дифракции двух различных длин волн дифрагированного света (на примере  $\alpha'_1$ ,  $\alpha'_2$ ,  $\alpha'_3$  и  $\alpha'_4$ ). В результате дифракции света от первого входного канала получается первый спектр, а от дифракции света со второго входного канала формируется второй спектр. Пути длинноволновых экстремумов двух спектров могут совпадать, как показано на рис. 2. Тем не менее, длина волны света в длинноволновом экстремуме первого спектра больше, чем длина волны света в длинноволновом экстремуме второго спектра, в связи с различными углами падения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Вследствие этого два различных спектра, каждый из которых имеет два различных набора длин волн, проецируются на второе вогнутое зеркало и отражаются на датчике изображения.

**3. Теория расчётов**

Аналитический расчёт системы может быть произведён через разложение волнового фронта на меридиональную и сагиттальную составляющие с системой координат в центре кривизны зеркал.

Меридиональное изображение внеосевого точечного объекта, полученное отражающей решёткой, удовлетворяет уравнению [13]:

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \alpha'}{r'_m} = \frac{\cos \alpha + \cos \alpha'}{R} \tag{2}$$

и сагиттальное изображение:

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'_s} = \frac{\cos \alpha + \cos \alpha'}{R} \tag{3}$$

В этих уравнениях R – это радиус кривизны дифракционной решётки;  $r'_m$  и  $r'_s$  являются расстояниями от падения точки главного луча на решётку до объекта, и как в меридиональной ( $r'_m$ ), так и сагиттальной ( $r'_s$ ) точке изображения (рис. 3). Эта конкретная конфигурация отвечает состоянию Роуланда [14]:

$$r = R \cos \alpha \Rightarrow r'_m = R \cos \alpha' \tag{4}$$

В этом случае объект и его меридиональное изображение лежат на окружности радиуса R/2, которая содержит центр кривизны решётки и входную щель (круг Роуланда), как показано на рис. 3.

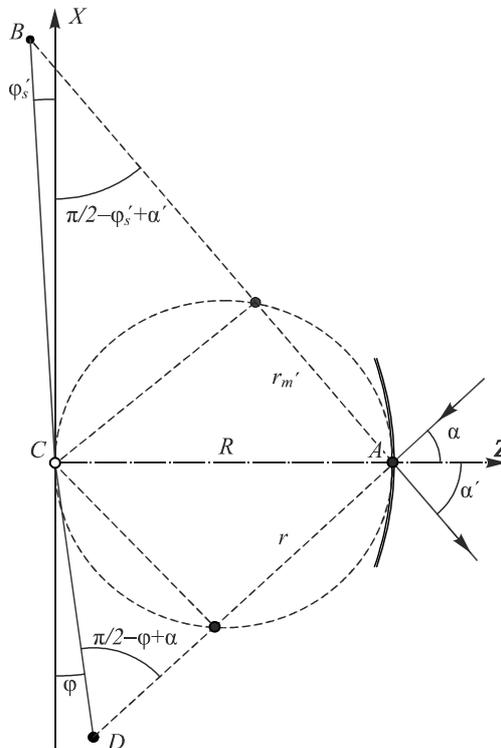


Рис.3. Расположение меридионального и сагиттального изображения через решётку для мнимой точки объекта

Однако, как видно из уравнения (3), сагиттальное изображение не лежит на этой окружности, что делает астигматизм наиболее важной aberrацией. Из треугольников ACB и ACD, используя теорему синусов, получаем:

$$\frac{1}{r} = \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{R \cos \varphi},$$

$$\frac{1}{r'} = \frac{\cos(\varphi'_s - \alpha')}{R \cos \varphi'_s} \tag{5}$$

Замена выражений (5) в уравнении (3) приводит к следующей инварианте (К) для сагиттального изображения:

$$K = \sin \alpha \tan \varphi = -\sin \alpha' \tan \varphi'_s. \quad (6)$$

Достаточным условием для состояния Роуланда, предполагающего изображение без комы, является то, что точка объекта и одновременно конечные и промежуточные изображения лежали на круге Роуланда каждого элемента при условии, что точка объекта расположена на первой окружности Роуланда. Рассмотрим это условие в математической форме. На рис. 4 нарисована окружность Роуланда из трёх элементов, центр общей кривизны (С), точка объекта (О) и оба (ИМ) меридиональных изображения (промежуточное и конечное) лежат на этих кругах. Объект располагается на 1-й окружности Роуланда, если угол между СО и главным лучом равен  $\pi/2$ . Это следует из геометрического свойства, которое гласит, что треугольник прямоуголен, если его гипотенуза является диаметром его описанной окружности.

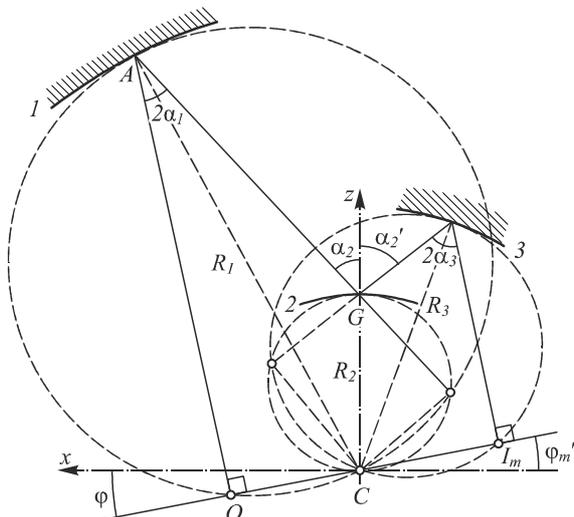


Рис. 4. Окружности Роуланда с указанием местоположения меридионального изображения

Взяв четырёхугольник АОСГ, получаем:

$$\begin{aligned} \pi/2 - 2\alpha_1 + (\pi - \alpha_2) + \pi/2 + \varphi = \\ = 2\pi \Rightarrow \varphi = \alpha_2 + 2\alpha_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Обратите внимание, что  $\alpha_1 < \alpha_2$ . Кроме того, расстояние СО можно выразить как:

$$CO = R_1 \sin \alpha_1 = -R_2 \sin \alpha_2, \quad (8)$$

где последнее равенство справедливо, т.к. первая и вторая окружности Роуланда пересекаются в меридиональном изображении главного зеркала. Таким же образом мы получаем следующие математические условия для окончательного расположения меридионального изображения:

$$\begin{aligned} \pi/2 - 2\alpha_3 + (\pi - \alpha'_2) + \pi/2 - \varphi'_m = \\ = 2\pi \Rightarrow \varphi'_m = \alpha'_2 - 2\alpha_3, \end{aligned} \quad (9)$$

$$CI_m = R_2 \sin \alpha'_2 = R_3 \sin \alpha_3. \quad (10)$$

Мы можем связать полярные углы обеих точек объекта и окончательного сагиттального изображения с углами падения и отражения на решётке через уравнения (6):

$$\sin \alpha_2 \tan \varphi = -\sin \alpha'_2 \tan \varphi'_s. \quad (11)$$

С другой стороны, радиальные расположения сагиттального изображения могут быть связаны с меридиональными точками путём:

$$CI_s = \frac{CI_m}{\cos(\varphi'_m - \varphi'_s)}. \quad (12)$$

Определив местонахождение окончательных меридиональных и сагиттальных изображений, несложно определить астигматизм как расстояние между ними:

$$\Delta_{acm} = CI_s \sin(\varphi'_m - \varphi'_s). \quad (13)$$

Таким образом, условие для достижения нулевого астигматизма для данной длины волны (которая может быть взята как средняя из спектрального диапазона спектрометра) является:

$$\overline{\varphi}' = \overline{\varphi}'_s = \overline{\varphi}'_m = \overline{\alpha}'_2 - 2\overline{\alpha}'_3. \quad (14)$$

Если это так, то очевидно из уравнения (12), что:

$$\overline{CI} = \overline{CI}_m = \overline{CI}_s. \quad (15)$$

Вследствие дисперсии дифракционной решётки меридиональные и сагиттальные изображения в действительности кривые вместо точек. Уравнение (14) гарантирует лишь нулевой астигматизм по длине волны  $\bar{\lambda}$ , где кривые пересекаются. Сделав меридиональные и сагиттальные кривые касательными друг к другу на длине волны  $\bar{\lambda}$ , мы можем убрать астигматизм для других длин волн. Математически условие касания означает, что астигматизм (расстояние между кривыми вдоль главных лучей) составляет по меньшей мере второй порядок длины волны. Таким образом, мы можем представить:

$$\left. \frac{d\Delta_{acm}}{d\lambda} \right|_{\bar{\lambda}} = 0 \Rightarrow \left. \frac{d(\varphi'_m - \varphi'_s)}{d\alpha'_2} \right|_{\bar{\alpha}'_2} = 0, \quad (16)$$

где мы используем уравнения (13) и (14). Производная меридионального угла определяется уравнениями (9) и (10):

$$\frac{d\varphi'_m}{d\alpha'_2} = 1 - 2 \frac{\tan \alpha_3}{\tan \alpha'_2}, \quad (17)$$

тогда как уравнение (11) позволяет получить:

$$\frac{d\varphi'_s}{d\alpha'_2} = -\frac{\sin \varphi'_s \cos \varphi'_s}{\tan \alpha'_2}. \quad (18)$$

Объединяя два последних уравнения и используя формулу (14), чтобы исключить  $\alpha'_2$ , запишем уравнение (16) как:

$$\tan(\overline{\varphi}' + 2\overline{\alpha}'_3) - 2 \tan \overline{\alpha}'_3 + (\sin 2\overline{\varphi}')/2 = 0. \quad (19)$$

Первый и второй члены могут быть записаны как функции  $\tan \bar{\varphi}'$ . После некоторых алгебраических преобразований кубическое уравнение через  $\tan \bar{\varphi}'$ :

$$\frac{\sin^3 \bar{\alpha}_3}{\cos \bar{\alpha}_3} + \tan \bar{\varphi}' - \tan \bar{\alpha}_3 \cos(2\bar{\alpha}_3) \tan^2 \bar{\varphi}' + [(1 + 2\sin^2 \bar{\alpha}_3)/2] \tan^3 \bar{\varphi}' = 0. \quad (20)$$

Уравнение (20) имеет единственное реальное решение для  $\tan \bar{\varphi}'$ . Кроме того, для характерных значений  $\bar{\alpha}_3$  ( $\bar{\alpha}_3 < 25^\circ$ )  $\bar{\varphi}'$  меньше, чем 0,1 рад, так что оно может быть быстро решено методом итераций. Решение в n-м порядке имеет вид:

$$\tan \bar{\varphi}'_n = -(\sin^3 \bar{\alpha}_3 / \cos \bar{\alpha}_3) + \tan \bar{\alpha}_3 \cos(2\bar{\alpha}_3) \times \tan^2 \bar{\varphi}'_{n-1} - [(1 + 2\sin^2 \bar{\alpha}_3)/2] \tan^3 \bar{\varphi}'_{n-1} \quad (21)$$

при  $\bar{\varphi}'_0 = 0$ .

Для завершения аналитического расчёта для гиперспектрометра Оффнера выводится конечное соотношение, связывающее размер спектрометра с плотностью штрихов дифракционной решётки. Для этого запишем уравнение (1) для длин волн на границах спектрального диапазона ( $\lambda^-, \lambda^+$ ) и вычтем их:

$$(\sin \alpha_2^+ - \sin \alpha_2^-) = km(\lambda^+ - \lambda^-) = km\Delta\lambda. \quad (22)$$

Делая то же самое для уравнения (10), мы имеем:

$$R_2(\sin \alpha_2^+ - \sin \alpha_2^-) = CI_m^+ - CI_m^- \cong h_{\text{спектр}}, \quad (23)$$

где  $h_{\text{спектр}}$  – это размер спектрального изображения, и последнее приближение может быть сделано из-за малых значений, которые принимает  $\varphi'$ .

Сочетание этих уравнений приводит к следующей формуле:

$$R_2 = h_{\text{спектр}} / (km\Delta\lambda), \quad (24)$$

которая связывает в пропорциональном соотношении плотность штрихов дифракционной решётки с размером спектрометра [15].

#### 4. Моделирование работы гиперспектрометра

Спектральный и пространственный размеры приняты в соответствии с типичными характеристиками 2/3'' ПЗС-матриц. Диафрагменное число выбрано f/4, поскольку это стандартная величина для изображающих спектрометров такого типа [16]. В случае нашего гиперспектрометра было принято, что дифракционная решётка изготовлена по технологии электронно-лучевой литографии и имеет треугольный профиль с малым углом блеска [17–19]. При проектировании профиля решётки была использована программа PCGrate-S(X), алгоритм которой разработан на основе электромагнитной теории [20]. Глубина рельефа определяется, исходя из оптимизации эффективности дифракционной решётки для заданного спектрального диапазона.

Общая методика расчёта осуществляется следующим образом. Сначала задаётся угол  $\bar{\alpha}_3$ , достаточный для избегания виньетирования и сохраняющий безопасный допуск. Он был выбран равным  $15^\circ$ . Затем, применяя вышеуказанные формулы в следующем по-

рядке: (21), (14), (10), (24), (10), (15), (1), (8), (11), (7), (8), система рассчитывалась для первой щели с диапазоном 400–1100 нм, приняв центральную длину волны равной 750 нм. Затем, рассчитав параметры для средней длины волны из второго диапазона 1000–1700 нм, и решив обратную задачу для радиусов зеркал, посчитанных к первой щели, мы получаем величины для местоположения и наклона плоскости объекта второй щели. Как показано далее, этот угол наклона плоскостей будет общим для обеих щелей. Количество каналов дифракционной решётки было задано 125 лин/мм. Расчёты производились в программе MS Excel (она была выбрана исходя из соображений простоты расчёта методом итераций), и затем полученные конструктивные значения применялись для моделирования в программном пакете для анализа и проектирования оптических систем – ZEMAX [21].

Результаты расчёта показаны в табл. 1, здесь расстояние СО для первой щели равно 43,61 мм, для второй – 49,27 мм.

Табл. 1. Основные конструктивные параметры

Поверхность и её тип	Радиус R, мм	Толщина d, мм	Оптический материал
Плоскость объекта	$\infty$	140,6	–
Вогнутое зеркало 1. Стандартная	-147,21	-71,78	Зеркало
Coordinate brake	–	–	– / $1,67^\circ$
А/Д. Дифракционная решётка	-75,43	65,75	Зеркало
Вогнутое зеркало 2. Стандартная	-141,18	-146,27	Зеркало
Плоскость изображения	$\infty$	–	–

Результаты моделирования приведены на рис. 5–6. Рис. 5 позволяет оценить пятна рассеяния точки в плоскости изображения для длины волны 1 мкм в точках поля для первой щели: – 8,8 мм; – 4,4 мм; 0 мм; и для второй: 1 мм; 5,4 мм; 9,8 мм с учётом двухмерности щелей (ширина щели была выбрана 12 мкм).

На рис. 6 показаны полученные спектры двух каналов в плоскости изображения (детектора).

Как мы можем видеть, оба спектра, 1-й и 2-й, получаемые двумя входными каналами соответственно, имеют различные диапазоны длин волн, несмотря на то, что оба спектра дифрагируют от дифракционной решётки под одинаковыми углами. Общий диапазон длин волн для спектров этих двух каналов больше, чем диапазон длин волн в спектре какого-либо одного канала.

Если один источник света поступает на оба входных канала, свет может быть проанализирован в более широком диапазоне длин волн, чем с помощью обычного, т.е. одноканального спектрометра.

Выход от датчика изображения может быть соединён с компьютером или с другой цепью, которые могут «сшивать» эти два спектра в единый высокопропускающий. Датчик изображения может включать комбинацию двух или более секций, где датчики каждой секции изготовлены в соответствии с разными технологиями, так что каждая секция является чувствительной к определённому (возможно перекрывающемуся) диапазону длин волн.

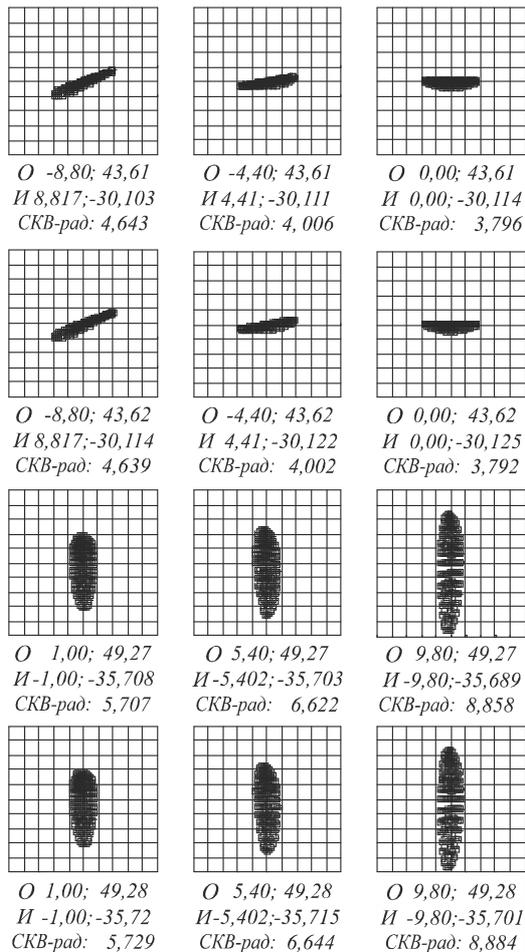


Рис. 5. Пятна рассеяния точки в плоскости изображения для длины волны 1 мкм.  $O$  – объект (цель),  $I$  – изображение (на матрице), указаны координаты в мм.  $СКВ-рад$  – среднеквадратическая величина радиуса пятна рассеяния, указана в мкм

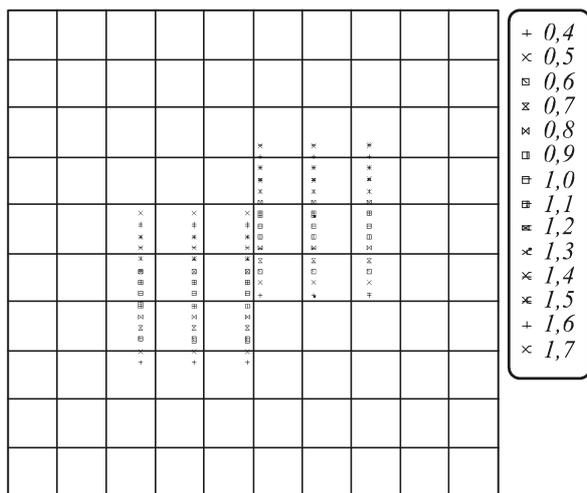


Рис. 6. Полученные спектры на плоскости изображения. Справа указаны длины волн в мкм

Например, одна часть датчика может использовать кремниевые ПЗС-элементы, а другая – элементы InGaAs. Аналогичным образом могут быть использованы комбинации датчиков, каждый с использованием различных технологий.

По результатам имитационного моделирования было показано, что данная схема может быть применена при проектировании многоканальных гиперспектрометров нового поколения. Её достоинства – компактные размеры и малый вес, высокая светосила и значительная корректировка аберраций, а также работа на сравнительно широком спектральном диапазоне с высоким показателем пространственного разрешения – позволяют получать высококачественные гиперспектральные изображения для решения обширного круга задач.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 № 218: договор № 02.G36.31.0001 от 12.02.2013 г.).

### Литература

1. **Агапов, В.М.** На орбите новый КА наблюдения // Новости космонавтики. – 2000. – № 5. – С. 22-23.
2. **Горбунов, Г.Г.** Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли / Г.Г. Горбунов, А.В. Дёмин, В.О. Никифоров, А.М. Савицкий, Ю.С. Скворцов, М.Н. Сокольский, В.П. Трегуб // Оптический журнал. – 2009. – № 76. – С. 75-82.
3. **Шовенгердт Р.А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с. (R.A. Schpwengerdt, Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. – Burlington MA: Elsevier Inc. Publishers, 2007.)
4. **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.
5. **Offner, A.** New Concepts in Projection Mask Aligners / A. Offner // Optical Engineering. – 1975. – Vol. 14(2). – P. 130-132.
6. **Offner, A.** Annular field systems and the future of optical microlithography / A. Offner // Optical Engineering. – 1987. – Vol. 26(4). – P. 294-299.
7. **Chrip, M.P.** Convex diffraction grating imaging spectrometer // Patent No. US 5880834 A. Date of Publication 9.03.1999.
8. **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.
9. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – V. 37, Issue 31. – P. 7200-7208.
10. **Muller, R.E.** Electron-Beam Fabrication of Analog-Relief Diffractive Optics on Non-Flat Substrates at Jet Propulsion Laboratory / R.E. Muller, D. Wilson, P. Maker // Conference Paper Propulsion Lab., California Inst. of Tech. – 2002.
11. **Брук, М.А.** Некоторые особенности нового метода формирования микрорельефа путём прямого электронно-лучевого травления резиста / М.А. Брук, Е.Н. Жихарёв, Д.Р. Стрельцов, В.А. Кальнов, А.В. Спиринов, А.Е. Рогожин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 204-10.
12. Оптика спектральных приборов / И.В. Пейсахсон. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

13. Введение в экспериментальную спектроскопию / В.И. Мальшев. – М.: Наука. Главная редакция Физико-математической литературы, 1979. – 480 с.
14. Проектирование спектральной аппаратуры / К.И. Тарасов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 216 с.
15. 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. – V. 28 – P. 2332-2339.
16. Kim, S.H. Design and construction of an Offner spectrometer based on geometrical analysis of ring fields / D. Kwo, G. Lawrence, S.H. Kim, H.J. Kong, J.U. Lee, J.H. Lee // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85. – P. 1-7.
17. Yang, B. Blaze Wavelength of Convex Blazed Grating in An Offner Spectrometer / B. Yang, Ch. Liu, X. Ding, X. Wang, Yi. Liu // SPIE Proceedings. – 2012. – Vol. 7655.
18. Грейсух, Г.И. Визуальная оценка влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 418-424.
19. Cheng, Y. Groove profile modification of convex blazed gratings by dip (spin) coating with photoresist / Yu. Cheng, Q. Liu, J. Wu // SPIE Proceedings. – 2014. – Vol. 9047. – 9 p.
20. PCGrate-S – программное обеспечение для расчета дифракционной эффективности различных типов рельефных решёток. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pcgrate.com/>.
21. ZEMAX Optical Design Program – программный пакет для анализа и проектирования оптических систем. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zemax.com/>.
- [6] Offner A. Annular field systems and the future of optical microlithography. Optica lEngineering 1987; 26(4): 294-9.
- [7] Chrisp MP. Convex diffraction grating imaging spectrometer // Patent No. US 5880834 A. Date of Publication 9.03.1999.
- [8] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Fabrication and study of the diffraction grating on a convex surface for spectral instrum. Copmuter Optics 2015; 39(2): 211-7.
- [9] Mouroulis P, Wilson DW, Maker PD, Muller RE. Convex grating types for concentric imaging spectrometers. Applied Optics 1998; 37(31): 7200-8.
- [10] Richard E, Wilson D, Maker P, Muller R, Jet. Muller Electron-Beam Fabrication of Analog-Relief Diffractive Optics on Non-Flat Substrates at Jet Propulsion Laboratory. Conference Paper Propulsion Lab., California Inst. of Tech 2002.
- [11] Bruk MA, Zhikharev EN, Streltsov DR, Kalnov VA, Spirin AV, Rogozhin AE. Some peculiarities of a new method of microrelief creation by the direct electron-beam etching of resist. Copmuter Optics 2015; 39(2): 204-10.
- [12] Peysahson IV. Optics of spectral devices. - Ed. 2nd, ext. and rev. Leningrad: "Engineering" Publisher 1975; 312 p.
- [13] Malyshev VI. Introduction to experimental spectroscopy. Moscow: "Nauka" Publisher 1979; 480 p.
- [14] Tarasov KI. Designing of spectroscopic equipment. Leningrad: "Engineering" Publisher 1980; 216 p.
- [15] Prieto-Blanco X. González-Núñez H, de la Fuent R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers. Journal of the Optical Society of America A2011; 28: 2332-9.
- [16] Kim SH, Kwo D, Lawrence G, Kong HJ, Lee JU, Lee JH Design and construction of an Offner spectrometer based on geometrical analysis of ring fields. Review of Scientific Instruments 2014; 85: P. 1-7.
- [17] Yang B, Liu C, Ding X, Wang X, Liu Y. Blaze Wavelength of Convex Blazed Grating in An Offner Spectrometer. SPIE Proceedings 2012; 7655.
- [18] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Sidiyakina ZA, Stepanov SA. Visual assessment of the influence of adverse diffraction orders on the quality of image formed by the refractive - diffractive optical system. Copmuter Optics 2014; 38(3): 418-24.
- [19] Cheng Y, Liu Q, Wu J. Groove profile modification of convex blazed gratings by dip (spin) coating with photoresist. SPIE Proceedings 2014; 9047.
- [20] PCGrate-S(X) – software for calculations of diffraction efficiency of different types of relief gratings on PCs. Source: (<http://www.pcgrate.com/>).
- [21] ZEMAX Optical Design Program – software package for analysis and designing of optical systems [electronic resource]. Source: (<https://www.zemax.com/>).

### References

- [1] Agapov VM. In orbit, the new spacecraft observations // News of Cosmonautics 2000; 5: 22-3.
- [2] Gorbunov GG, Demin AV, Nikiforov VO Sawicki AM, Skvortsov YS, Sokolsky MN, Tregub VP. Hyperspectral equipment for remote sensing. Opt 2009; 76: 75-82.
- [3] Schpwengerdt RA. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Burlington MA: "Elsevier Inc." Publishers, 2007.
- [4] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Doskolovich LL, Pavelyev AV. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the offner scheme. Copmuter Optics 2015; 39(1): 70-6.
- [5] Offner A. New Concepts in Projection Mask Aligners. Optical Engineering 1975; 14(2): 130-2.

## SIMULATION MODEL OF A MULTICHANNEL OFFNER HYPERSPECTROMETER

A.D. Golovin, A.V. Demin

Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics  
(ITMO University) Saint-Petersburg, Russia

### Abstract

We study an advanced airborne hyperspectral system based on the Offner scheme for Earth remote sensing that has the advantages of compact size and high spatial and spectral resolution. An algorithm that enables choosing the most effective design parameters is developed. A schematic design and a simulation model of the multichannel hyperspectrometer are discussed.

**Keywords:** Offner anastigmat, hyperspectrometer, multi-channel system, convex grating, Earth remote sensing.

**Citation:** Golovin AD, Demin AV. Simulation model of a multichannel Offner hyperspectrometer. Computer Optics 2015; 39(4): 521-8. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.

*Acknowledgments:* The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (in frame of the Government resolution of the Russian Federation of 09.04.2010 # 218: the contract № 02.G36.31.0001 of 02.12.2013).

#### *Сведения об авторах*

**Дёмин Анатолий Владимирович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой оптико-цифровых систем и технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Область научных интересов: математическое моделирование и исследование оптико-цифровых систем и комплексов; методы и средства обнаружения и распознавания объектов в оптическом диапазоне спектра.

E-mail: [dav\\_60@mail.ru](mailto:dav_60@mail.ru).

**Anatoliy Vladimirovich Demin**, Ph.D., professor, head of Opto-digital Systems and Technologies department of the St. Petersburg National Research University Information Technologies, Mechanics and Optics. Research interests: mathematical modeled by-tion and research opto-digital systems and complexes; methods and tools for detecting and recognizing, of objects in the optical range of the spectrum.

**Головин Арсений Дмитриевич**, аспирант кафедры оптико-цифровых систем и технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Область научных интересов: дифракционная оптика, наноинженерия, математическое моделирование оптико-цифровых систем и комплексов, разработка и проектирование оптических приборов и систем оснастки.

E-mail: [golovin@corp.ifmo.ru](mailto:golovin@corp.ifmo.ru).

**Arseny Dmitrievich Golovin**, graduate student of the Optical-digital Systems and Technologies department of the ITMO University. Research interests: diffractive optics, nanoengineering, mathematical modeling of the opto-digital systems and complexes, design and development of optical devices and equipment systems.

*Поступила в редакцию 10 июля 2015 г.  
Окончательный вариант – 14 сентября 2015 г.*