

ЮСТИРОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ПО СХЕМЕ ОФФНЕРА

© 2016 С. В. Карпеев¹, С. Н. Хонина¹, А. Р. Мурдагулов², М. В. Петров³

¹Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

²Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

³Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведены испытания макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера. Разработаны чертежи и изготовлены основные зеркальные элементы гиперспектрометра, в том числе дифракционная решётка на выпуклой сферической поверхности. Измерен профиль штриха изготовленной дифракционной решётки и проведено моделирование распределения энергии света по дифракционным порядкам в зависимости от длины волны. Разработана и изготовлена оптомеханика для необходимых юстировок элементов гиперспектрометра. Проведена юстировка макетной оптической схемы и получены изображения точки для трёх длин волн монохроматического излучения. Распределения энергии света по дифракционным порядкам и координаты максимумов согласуются с результатами моделирования. Проведены испытания спектрометра на тестовых изображениях в полихроматическом излучении под управлением разработанного программного обеспечения.

Гиперспектрометр, схема Оффнера, профиль штриха, распределения энергии по дифракционным порядкам, юстировка макетной оптической схемы.

Введение

Переход к гиперспектральным изображениям исследуемых сцен в бортовых оптико-электронных системах (ОЭС) и к распознаванию по спектрально-топологическим образам позволяет с помощью малых космических аппаратов (МКА) наблюдения решать многие из тех задач, которые прежде решались КА с крупногабаритными панхроматическими оптическими системами [1]. 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 [2]. Основным преимуществом такого режима является синхронность при

сборе линейно диспергированного спектра.

Перспективными спектрометрами для использования на малых КА являются изображающие спектрометры в конфигурации Оффнера [3–7]. Схема Оффнера наиболее перспективна из-за своей простоты, малых габаритов и высоких оптических показателей. С её помощью можно достичь снижения хроматических aberrаций и дисторсии до низкого уровня на сравнительно широком спектральном диапазоне при сохранении компактных размеров гиперспектрометра. В простейшем случае спектрометр Оффнера содержит два концентрических зеркала. В качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решётка, выполненная на одном из зеркал. Использование дифракционной решётки позволяет достичь большей компактности и меньших хроматических aberrаций.

Цитирование: Карпеев С.В., Хонина С.Н., Мурдагулов А.Р., Петров М.В. Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 1. С. 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206

Моделирование работы такого спектрометра [8–10] подтвердило высокие характеристики получаемых гиперспектральных изображений (ГИ).

1. Изготовление и исследование решётки спектрометра

Наиболее сложным в реализации элементом спектрального прибора является дифракционная решётка спектрографа, выполненная на одном из зеркал, в рассматриваемом случае – на выпуклом сферическом зеркале. Наибольшую энергетическую эффективность, сосредоточенную в одном дифракционном порядке, обеспечивают решётки с треугольным профилем (решётки «с блеском»), но они наиболее сложны с технологической точки зрения. Такой профиль можно обеспечить либо нарезкой на специальной де-

лительной машине, либо электронно-лучевой литографией.

Для решётки размером 30 на 18 мм с пространственной частотой в 60 линий на миллиметр, которая должна быть реализована на поверхности зеркала рассчитанного спектрометра, оптимальной является технология нарезки. Предприятие НПО ГИПО имеет необходимое оборудование и опыт изготовления выпуклых и вогнутых дифракционных решёток [11]. Разработанный чертёж решётки спектрометра показан на рис. 1.

Результат измерения полученного профиля решётки на микроинтерферометре Zygo New View 7000 приведён на рис. 2.

Результаты моделирования дифракции света на решётке для трёх разных длин волн приведены на рис. 3.

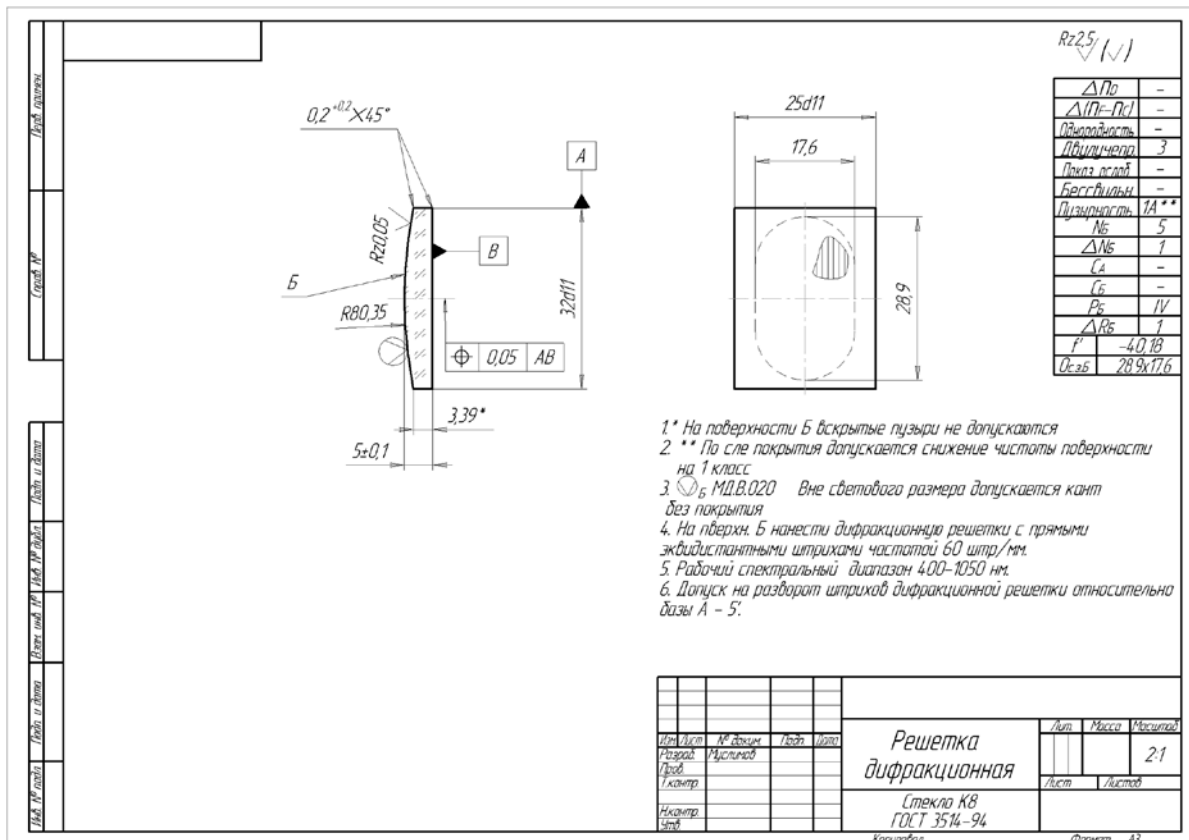


Рис. 1. Рабочий чертёж дифракционной решётки

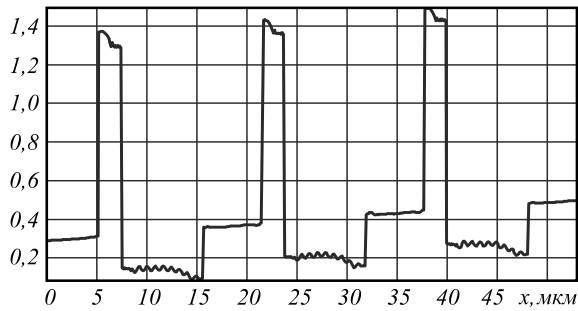


Рис. 2. Профиль дифракционной решётки на поверхности зеркала

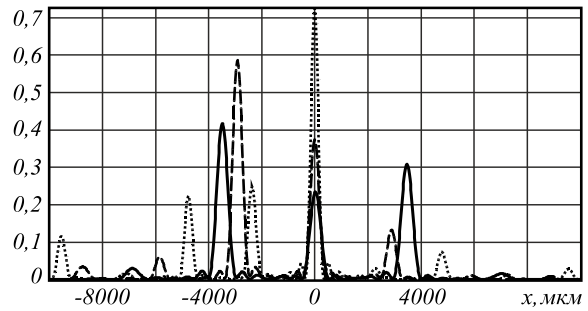


Рис. 3. Распределение порядков в фокальной плоскости: для излучения 440 нм (точечная линия), 540 нм (пунктирная линия), 640 нм (сплошная линия)

Результаты моделирования показывают существенную асимметрию в картине дифракции между +1 и -1 порядками. Это объясняется асимметричным профилем решётки. Перекрытия порядков для разных длин волн [9] не происходит. Эффективность для разных длин волн различна и составляет 15-35%. В дальнейшем при калибровке гиперспектрометра эта неравномерность чувствительности может быть скорректирована.

2. Сборка и юстировка оптической схемы спектрометра в монохроматическом излучении

Для экспериментального подтверждения работоспособности прибора были проведены испытания макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера. Эскиз оптической системы спектрометра со всеми необходимыми размерами и допусками приведён на рис. 4.

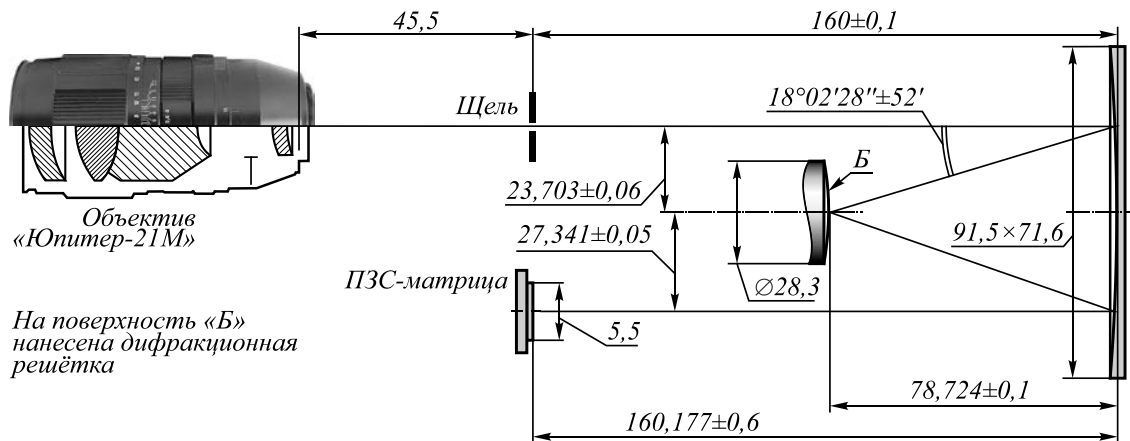


Рис. 4. Оптическая система спектрометра

Из рис. 4 видно, что допуск на установку основных элементов схемы не превышает 0,06–0,1 мм линейной погрешности и 52' угловой. Обеспечить такие точности в процессе изготовления механических деталей макета не представлялось возможным, поэтому была разработана и изготовлена оптомеханика, обеспечивающая необходимые юстировки элементов гиперспектрометра. Все элементы оптиче-

ской системы были смонтированы на общем основании из дюралюминия толщиной 8 мм с креплением на оптико-механических юстировочных приспособлениях производства фирмы Standa. Эти приспособления обеспечивали поперечное перемещение щели, регулировку сферического зеркала вдоль оптической оси и по высоте, регулировку решётки поперёк и вдоль оптической оси и регулировку ПЗС-

матрицы вдоль и поперёк оптической оси. Указанные перемещения вместе со штатной наводкой на резкость объектива позволяют полностью реализовать все степени свободы для регулировки взаимного положения элементов схемы.

Основным отличием от системы, рассчитанной в [6; 7], является замена штатного объектива на бытовой телеобъектив «Юпитер–21М», предназначенный для фотоаппаратов типа «Зенит». Этот объектив имеет основные параметры (светосила и фокусное расстояние), сходные с параметрами штатного объектива. Решётка спектрометра изготавливалась и приобреталась в комплекте с зеркалом на НПО ГИПО. Щель спектрометра шириной 15 мкм была изготовлена на фотопостроителе CLWS-200 в виде маски из хрома. ПЗС-камера имеет 2048×1526 пикселей, размер чувствительной области – 5×6,55 мм, размер пиксела – 3,5 мкм. При испытаниях макета такой малый размер пиксела позволяет более подробно изучить пятно рассеяния.

Для испытаний макета в помещении телеобъектив Юпитер 21М был заменён на более короткофокусный Индустар 61ЛЗМС. Основной целью первого этапа испытаний было получение изображения монохроматического точечного источника света для трёх длин волн монохроматического излучения от перестраиваемого лазера EKSPLA NT-200. Вначале осуществлялась наводка объектива на резкость в плоскость щели и совмещение щели и полученного изображения точки. Добивались получения пятна круглой формы после прохождения щели без дифракционных полос, свидетельствующих о попадании света на края щели. Дальнейшая юстировка оптической системы состояла в последовательной регулировке положения элементов по ходу лучей света до достижения безаберрационного изображения точки. Были получены изображения точки в разных цветах. Полученные распределения энергии света по дифракционным порядкам и координаты максимумов согласуются с результатами моделирования оп-

тической системы, приведёнными на рис. 3. Измеренное расстояние между изображениями точек синего и красного цветов в первом порядке дифракции составило около 1300 мкм. На рис. 5 приведено увеличенное изображение пятна рассеяния точки в красном цвете.

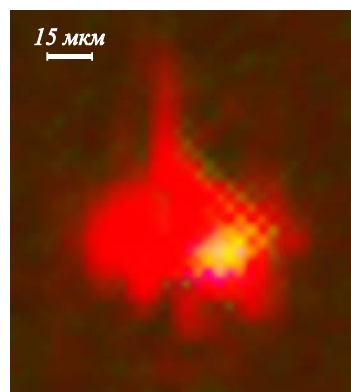
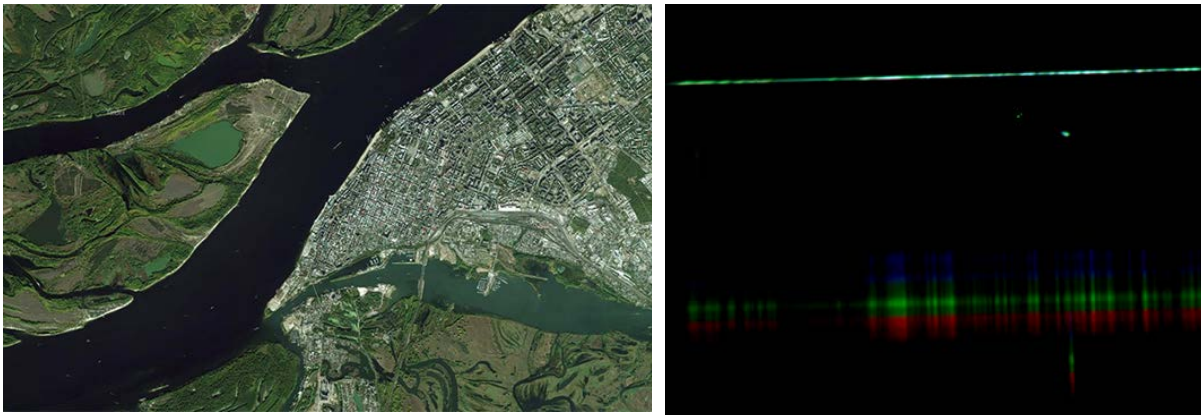


Рис. 5. Изображение точки для красного цвета

Размеры максимума по уровню 0,5 в пятне рассеяния составляют 4×4 пиксела, то есть около 15 мкм, что соответствует ширине щели 15 мкм и паспортному разрешению изображающего объектива. Можно сделать вывод, что потери разрешения в спектрометре нет. Для стандартных параметров орбиты разрешение на местности составит около 20 м. При таком пространственном разрешении достигается спектральное разрешение около 2 нм.

3. Испытания спектрометра в полихроматическом излучении под управлением разработанного программного обеспечения

Испытания, проведённые с точечным источником монохроматического излучения, позволяют перейти к исследованию работы полихроматических полнокадровых изображений. Щель гиперспектрометра выделяет полоску изображения, построенного изображающей системой. На фотоприёмнике создаётся спектральное разложение этой полоски. Пример исходного изображения и изображения, получаемого на фотоприёмной матрице спектрометра, приведён на рис. 6.



Исходное изображение Самарской Луки

Изображение на фотоприёмной матрице

Рис. 6. Гиперспектральное разложение тестового полихроматического изображения

На фотоприёмной матрице в верхней части кадра имеется изображение полосы регистрируемого объекта, образуемое нулевым порядком. В нижней части кадра имеются последовательно расположенные изображения полосы в разных цветах, начиная от синего и заканчивая красным. При испытаниях в монохроматическом излучении были измерены расстояния от изображения в нулевом порядке до изображений, соответствующих определённым длинам волн. Таким образом, была проведена калибровка спектрометра по длинам волн. При формировании спектральных изображений используется только нижняя часть кадра, как показано на рис. 7, описываемая некоторой зоной интереса.

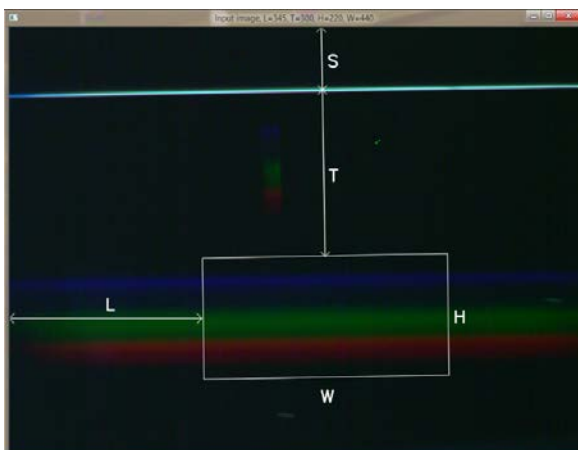


Рис. 7. Формирование зоны интереса при записи ГИ из кадра

Параметры, определяющие зону интереса, следующие: отступ от левого края кадра L ; отступ от линии, определяющей нулевой порядок дифракции T ; вертикальный H и горизонтальный W размеры.

Величины L , T , H , W являются входными параметрами. Положение линии, изображающей полосу изображения в нулевом порядке дифракции (величина S на рис. 2), и наклон этой прямой определяются автоматически.

Для испытаний спектрометра в условиях, имитирующих реальные, был собран стенд, в котором движущееся полихроматическое изображение создавалось проектором на экране, а щель гиперспектрометра была ориентирована перпендикулярно направлению движения. Распределение данных от гиперспектральной аппаратуры (ГСА) по кадрам описано в [2]. Каждый кадр содержит спектральную развёртку одной строки. Таким образом, разные строки содержатся в различных кадрах. На рис. 8 представлена последовательность кадров, регистрируемых камерой, и схематичное расположение спектрального разложения каждой строки изображения.

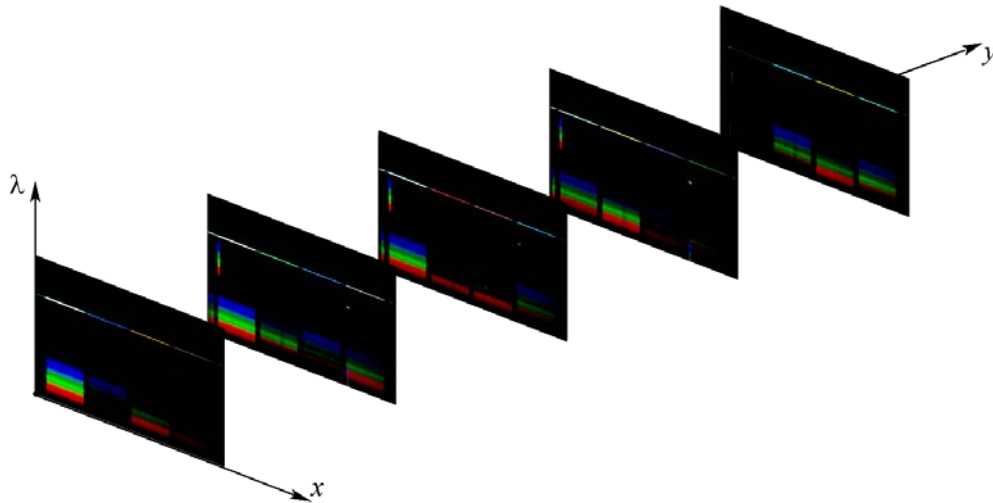


Рис. 8. Распределение гиперспектральных слоёв по кадрам регистрируемой видеопоследовательности

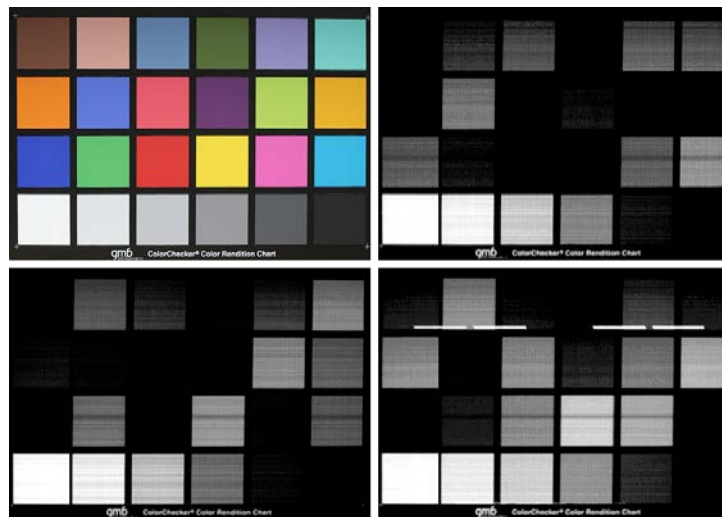


Рис. 9. Тестовое изображение и три спектральных слоя, экспортированные из гиперкуба

Поскольку, как отмечалось выше, эффективность решётки сильно зависит от длины волны, необходимым этапом испытаний является построение спектрального разложения тестовой таблицы. Пример такой таблицы, использовавшейся в экспериментах, приведён на рис. 9 в левом верхнем углу. Вокруг таблицы приведены три спектральных слоя, соответствующих длинам волн, приведённым на рис. 3.

На основе проведённого теста было установлено, что коэффициенты передачи спектральных компонентов соответствуют расчётным (рис. 3).

Кроме коррекции коэффициентов передачи от длины волны также существенное значение имеет подавление шу-

ма на изображениях. Шумы в данных, получаемых с ГСА, обусловлены различными причинами, в частности, шумы ПЗС матрицы камеры при недостаточной освещённости, искажения в видеотрактном тракте экспериментального образца ГСА. Для решения задачи компенсации шумов ГИ использованы методы оптимизации, основанные на оптимальном решении двойственной задачи [12]. На рис. 10 представлены исходный и обработанный слой гиперспектрального изображения Самарской Луки, экспортированные из гиперкуба до и после обработки. Шум уменьшился и при этом сохранились детали на изображении.

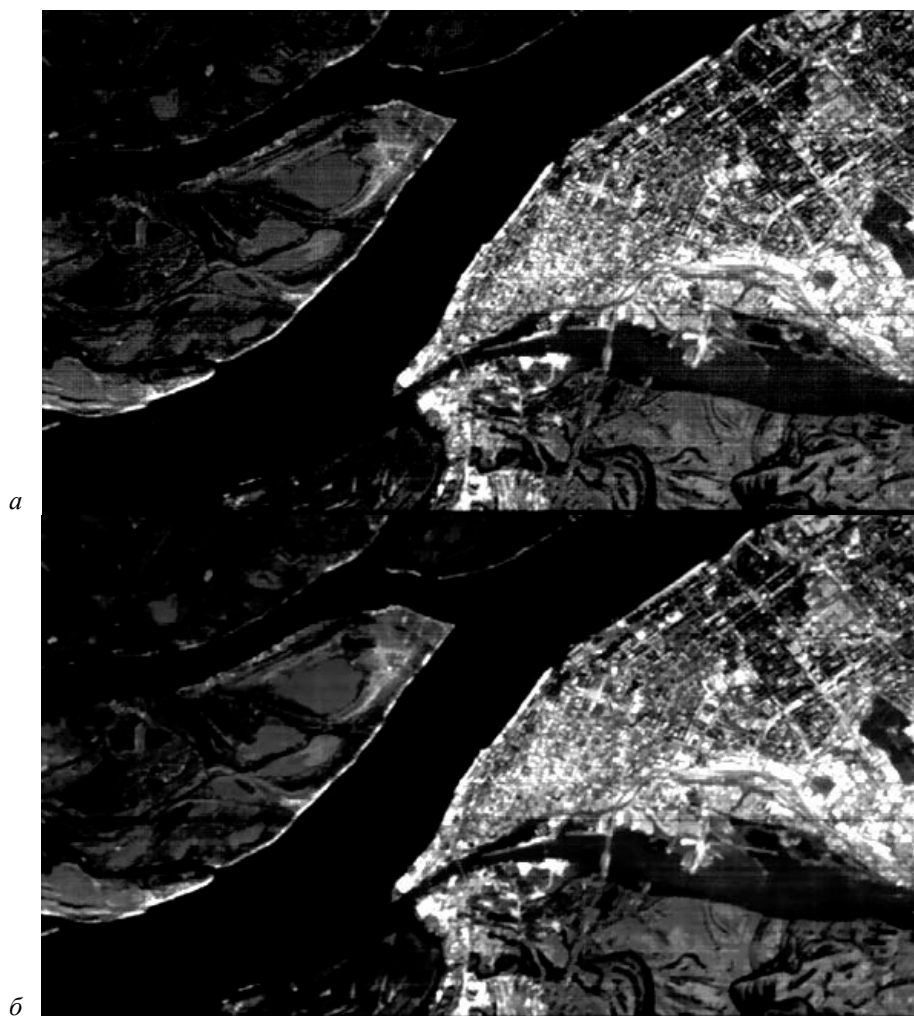


Рис. 10. Пример фильтрации шумов на слое гиперспектрального изображения: слой исходного гиперкуба (а) и соответствующий ему слой скорректированного гиперкуба (б)

Заключение

Получены результаты исследований пространственного разрешения макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера. Максимальное пятно рассеяния соответствует паспортному разрешению изображающего объектива и составляет 15 микрон. Проведённые расчёты спектральных характеристик дифракционной решётки гиперспектрометра показали различную эффективность для трёх тестовых длин волн: 440 нм, 540 нм и 640 нм, состав-

ляющую 15-35 %. Эти данные были использованы при калибровке макетного образца.

Разработано прикладное математическое обеспечение для обработки результатов измерений, собирающее гиперкуб в формате GeoTIFF. Сформулированы критерии, определяющие зоны интереса при обработке спектрограмм. На их основе построены гиперспектральные изображения фрагмента Самарской Луки. Выполнено сканирование тестового изображения цветной шкалы и экспортированы три спектральных слоя из гиперкуба, соответствующие тестовым длинам волн.

Библиографический список

1. Горбунов Г.Г., Дёмин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 10. С. 75-82.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Mouroulis P., Sellar R.G., Wilson D.W., Shea J.J., Green R.O. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy // Optical Engineering. 2007. V. 46, Iss. 6. P. 063001. DOI: 10.1117/1.2749499
4. Mouroulis P., Wilson D.W., Maker P.D., Muller R.E. Convex grating types for concentric imaging spectrometers // Applied Optics. 1998. V. 37, Iss. 31. P. 7200-7208. DOI: 10.1364/ao.37.007200
5. Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., Couce B., de la Fuente R. Analytical design of an Offner imaging spectrometer // Optics Express. 2006. V. 14, Iss. 20. P. 9156-9168. DOI: 10.1364/oe.14.009156
6. Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., González-Nuñez H., Mouriz M.D., Lago E.L., de la Fuente R. The Offner imaging spectrometer in quadrature // Optics Express. 2010. V. 18, Iss. 12. P. 12756-12769. DOI: 10.1364/oe.18.012756
7. Lee J.H., Jang T.S., Yang H.-S., Rhee S.-W. Optical Design of a Compact Imaging Spectrometer for STSAT3 // Journal of the Optical Society of Korea. 2008. V. 12, Iss. 4. P. 262-268. DOI: 10.3807/JOSK.2008.12.4.262
8. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Карсаков А.В., Хонина С.Н. Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 271-280.
9. Досколович Л.Л., Досколович Л.Л., Безус Е.А., Быков Д.А. О коррекции эффекта перекрытия дифракционных порядков в спектрометре на основе схемы Оффнера // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 4. С. 777-781.
10. Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Досколович Л.Л., Павельев А.В. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 1. С. 70-76.
11. Карпеев С.В., Хонина С.Н., Харитонов С.И. Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 2. С. 211-217.
12. Chambolle A., Pock T. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging // Journal of Mathematical Imaging and Vision. 2011. V. 40, Iss. 1. P. 120-145. DOI: 10.1007/s10851-010-0251-1

Информация об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара. E-mail: karp@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара. E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

Мурдагулов Артур Радикович, инженер-конструктор второй категории, АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. E-mail: ssiimss@rambler.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, волоконная оптика.

Петров Максим Витальевич, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: max.vit.petrov@gmail.com. Область научных интересов: обработка изображений, параллельные вычисления.

ALIGNMENT AND STUDY OF PROTOTYPES OF THE OFFNER HYPERSPECTROMETER

© 2016 S. V. Karpeev¹, S. N. Khonina¹, A. R. Murdagulov², M. V. Petrov³

¹Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara, Russian Federation

²Space Rocket Center «Progress»; Samara, Russian Federation

³Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

A prototype of the hyperspectrometer based on the Offner scheme has been tested. Drawings have been produced and the main mirror elements of the hyperspectrometer including diffraction grating on a convex spherical surface have been fabricated. The profile of the grating groove has been measured and light energy distribution in diffraction orders has been modeled as a function of wavelength. Optomechanical elements for the necessary alignments of the hyperspectrometer elements have been designed and manufactured. Adjustment of the optical prototyping scheme has been implemented and point images for three wavelengths of monochromatic radiation have been obtained. Distribution of light energy in diffraction orders and maxima positions are in an agreement with the simulation results. The spectrometer has also been tested on test images in polychromatic radiation under the control of the developed software.

Hyperspectrometer, Offner scheme, grating groove profile, energy distribution in diffraction orders, adjustment of the optical prototyping scheme.

References

1. Gorbunov G.G., Demin A.V., Nikiforov V.O., Sawicki A.M., Skvortsov Y.S., Sokolsky M.N., Tregub V.P. Hyperspectral apparatus for remote probing of the earth. *Journal of Optical Technology*. 2009. V. 76, Iss. 10. P. 75-82.
2. Schowengerdt R.A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Burlington MA: Elsevier Inc. Publishers, 2007. 509 p.
3. Mouroulis P., Sellar R.G., Wilson D.W., Shea J.J., Green R.O. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. *Optical Engineering*. 2007. V. 46, Iss. 6. P. 063001. DOI: 10.1117/1.2749499
4. Mouroulis P., Wilson D.W., Maker P.D., Muller R.E. Convex grating types for concentric imaging spectrometers. *Applied Optics*. 1998. V. 37, Iss. 31. P. 7200-7208. DOI: 10.1364/ao.37.007200
5. Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., Couce B., de la Fuente R. Analytical design of an Offner imaging spectrometer. *Optics Express*. 2006. V. 14, Iss. 20. P. 9156-9168. DOI: 10.1364/oe.14.009156

Citation: Karpeev S.V., Khonina S.N., Murdagulov A.R., Petrov M.V. Alignment and study of prototypes of the Offner hyperspectrometer. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 1. P. 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206

6. Prieto-Blanco X., Montero-Orille C., González-Nuñez H., Mouriz M.D., Lago E.L., de la Fuente R. The Offner imaging spectrometer in quadrature. *Optics Express*. 2010. V. 18, Iss. 12. P. 12756-12769. DOI: 10.1364/oe.18.012756
7. Lee J.H., Jang T.S., Yang H.-S., Rhee S.-W. Optical Design of a Compact Imaging Spectrometer for STSAT3. *Journal of the Optical Society of Korea*. 2008. V. 12, Iss. 4. P. 262-268. DOI: 10.3807/JOSK.2008.12.4.262
8. Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Karsakov A.V., Khonina S.N. Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. *Computer Optics*. 2014. V. 38, no. 2. P. 271-280. (In Russ.)
9. Doskolovich L.L., Bezus E.A., Bykov D.A. On the compensation of the diffraction orders overlap effect in the Offner spectrometer. *Computer Optics*. 2014. V. 38, no. 4. P. 777-781. (In Russ.)
10. Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Doskolovich L.L., Pavelyev A.V. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme. *Computer Optics*. 2015. V. 39, no. 1. P. 70-76. (In Russ.)
11. Karpeev S.V., Khonina S.N., Kharitonov S.I. Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element. *Computer Optics*. 2015. V. 39, no. 2. P. 211-217. (In Russ.)
13. Chambolle A., Pock T. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 2011. V. 40, Iss. 1. P. 120-145. DOI: 10.1007/s10851-010-0251-1

About the authors

Karpeev Sergey Vladimirovich, Doctor of Physical and Mathematical Science; Leading Researcher, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation. E-mail: karp@smr.ru. Area of Research: diffractive optics, mode and polarization transformations, fiber optics, optical image processing.

Khonina Svetlana Nikolaevna, Doctor of Physical and Mathematical Science; Leading Researcher, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation. E-mail: khonina@smr.ru. Area of Research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Murdagulov Artur Radikovich, design engineer, Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: ssiimss@rambler.ru. Area of Research: diffractive optics, fiber optics.

Petrov Maksim Vital'yevich, engineer, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: max.vit.petrov@gmail.com. Area of Research: image processing, parallel calculations.