

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧКХ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ОФФНЕРА

В.А. Бланк, Р.В. Скиданов

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Рассмотрен изображающий спектрометр на основе схемы Оффнера. Определена функция частотно-контрастной характеристики изображающего спектрометра на основе схемы Оффнера. Определена ошибка восстановления спектра для красного светодиода.

Ключевые слова: схема Оффнера, частотно-контрастная характеристика, спектр.

Введение

Изображающие спектрометры стали мощной техникой для решения многих задач, таких как точное отображение широких областей, идентификация объектов, распознавание, обнаружение цели, оценка окружающей среды и управление [1-3]. Области применения таких спектрометров – это научные исследования, дистанционное зондирование, медицина, экология, производство, сельское хозяйство, безопасность и многие другие.

Изображающие спектрометры - это оптические инструменты, которые сочетают в себе обычную визуализацию со спектроскопией для записи спектра каждой точки в сцене [4-6]. Для отделения спектральных компонент света чаще всего используют дифракционные решетки или призмы. Использование дифракционных решеток обеспечивает большую компактность спектрометров. Среди таких спектрометров выделяют схемы Дайсона и Оффнера. Схема Дайсона является наиболее простой [4,7]. Она состоит из линзы из кварцевого стекла и вогнутой решетки, входная щель перпендикулярна плоскости рисунка [8].

Для получения гиперспектральных изображений высокого качества оптимально использовать спектрометры Оффнера, потому что они имеют более высокое качество изображений и спектральное разрешение, чем у других видов изображающих спектрометров для большой длины щелевой диафрагмы и относительно небольшого фокусного расстояния. Классическая схема Оффнера состоит из сферического зеркала и асферической выпуклой дифракционной решетки [3, 9, 10]. Уровень геометрических aberrаций такой системы невысок, за счет того что оптический пучок дважды отражается от главного зеркала спектрометра и основные aberrационные искажения за счет разных знаков при разных отражениях компенсируются [10]. В работах [3, 11, 12] описана конструкция гиперспектрометра на основе схемы Оффнера, в [11] проведено исследование, в котором авторы экспериментально измерили функцию рассеяния точки, показав, что ширина этой функции соответствует результатам моделирования [12]. Однако в работе [11] не было проведено исследование по определению частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) спектрометра и по его спектральному разрешению. В

настоящей работе проводится исследование ЧКХ гиперспектрометра и его спектральные характеристики с помощью черно-белой мирры освещаемой источником света с заданным спектральным распределением.

Определение ЧКХ и функции осстрановления спектра

В данной работе необходимо было определить функцию ЧКХ гиперспектрометра и ошибку восстановления спектра. Для этого была собрана установка на основе схемы Оффнера (рис. 1).

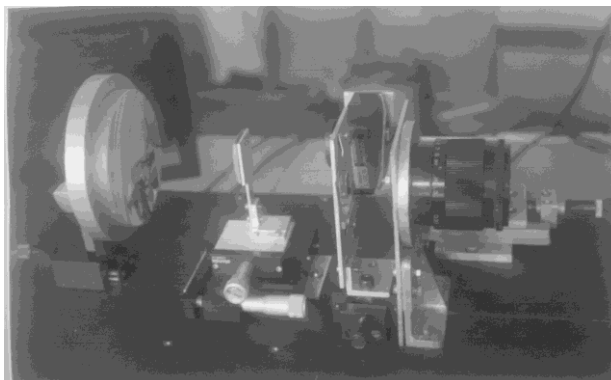


Рис. 1. Схема установки, где 1- телеобъектив «Юпитер–21М», 2- щель спектрометра шириной 15 мкм, 3-выпуклое зеркало, 4-вогнутое зеркало, 5- ПЗС-камера.

Конструкция, представленная на рис. 1, в рабочем состоянии закрыта светонепроницаемым кожухом. В данной схеме использовались телеобъектив «Юпитер-21М», щель спектрометра шириной 15мкм, камера TOUPCAM UCMOS03100KPA с максимальным разрешением 2048 x 1536 пикс, размер чувствительной области - 6,55×4,92 мм, размер пиксела – 3,2 мкм. Решётка спектрометра изготавливалась и приобреталась в комплекте с зеркалом на НПО ГИПО.

Для определения функции ЧКХ гиперспектрометра необходимо было установить мирру на расстоянии 0,8 м и снять ее, освещая белым светом.

Спектральные изображения мирры при смещении изображения с шагом 0,2 см, продемонстрированы на рис. 2.

Для формирования гиперспектрального куба [13], изображения полученные при помощи спектрометра, необходимо обработать. После проведения обработки, полученных изображений, было восстановлено изображение мирры при белом свете (рис. 3).

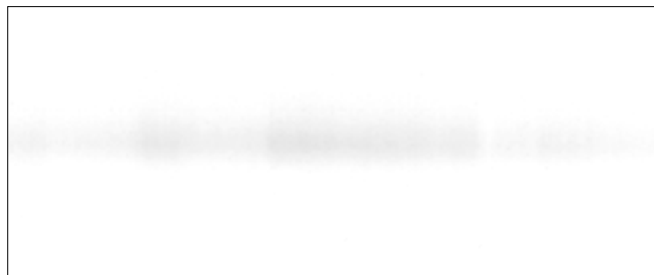


Рис. 2. Спектральное изображение мирры, освещенной белым светом



Рис. 3. Изображение мирры сформированное изображающим гиперспектрометром на длине волны 550нм.

Исходя из рис. 3 был определен контраст полосатых изображений на мирре имеющих разный период. Контраст определялся по формуле

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

где I_{\max} – интенсивность изображения амплитудной решетки мирры в максимуме, где I_{\min} – интенсивность изображения амплитудной решетки мирры в минимуме.

Далее вычислялось среднее значение контраста и СКО по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2}, \quad (2)$$

где n – количество измерений, \bar{k} - среднее значение контраста.

На основе полученных результатов был построен график функции ЧКХ (рис. 4).

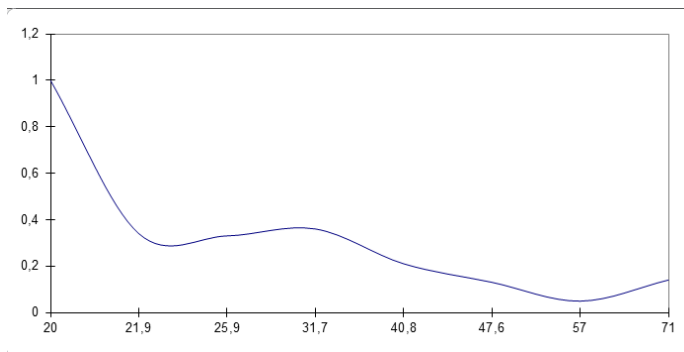


Рис.4 Функция ЧКХ для изображающего спектрометра на длине волны 550 нм.

Для определения ошибки восстановления спектра снималось пятно красного цвета на белой бумаге, которая освещалась диодами.

А за эталон бы взят спектр, измеренный на спектрометре MS7501. На рис. 5 представлен спектр красного светодиода, полученный на спектрометре, основанном на схеме Оффнера (прерывистая линия) в сравнении с эталонным спектром, полученным на спектрометре MS7501 (сплошная линия).

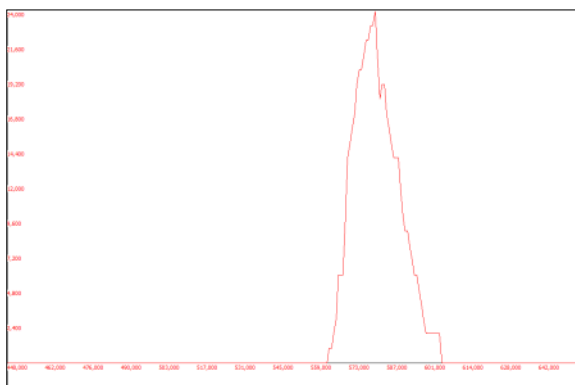


Рис.5. Спектр, полученный на спектрометре MS7501 и спектр, полученный на изображающем гиперспектрометре.

На основе, полученного спектрального распределения и сравнения его с эталонным распределением было получено значение ошибки (среднеквадратичное отклонение) измерения спектрометра, основанного на схеме Оффнера. Для спектра красного диода данная ошибка составила 18%. Довольно значительная величина ошибки связана с относительно низкой чувствительность используемой матрицы в данном спектральном диапазоне.

Заключение

В данной работе с помощью изображающего гиперспектрометра на основе схемы Оффнера были получены спектральные изображения. На их основе проведена проверка точности формирования спектральной функции красного светодиода, которая сравнивалась с эталонной, измеренной на точном спектрометре MS7501. СКО составило 18%. Так же была определена функция ЧКХ изображающего спектрометра на основе схемы Оффнера.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Литература

1. Cobb, J.M. Innovative Manufacturing and Test Technologies for Imaging Hyperspectral Spectrometers / J.M. Cobb, LE. Comstock, P.G. Dewa, M.M Dunn, S.D. Flint // Proceedings of SPIE. – 2006. – Vol. 6233. – P. 62330R-1-9.
2. Prieto-Blanco, X. Analytical design of an Offner imaging spectrometer / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, R. de la Fuente // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(20). – P. 9156-9168.
3. 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.
4. Montero-Orille, C. Design of Dyson imaging spectrometers based on the Rowland circle concept / C. Montero-Orille, X. Prieto-Blanco, H. Gonzalez-Nunez, R. de la Fuente // Applied Optics. 2011. – Vol. 50(35). – P. 6487-6494.
5. Gat, N. Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review / N. Gat // Proceeding of SPIE. – 2000. – Vol. 4056. – P. 50-64.
6. Kerekes, J. Imaging spectrometers go commercial / J. Kerekes // Laser Focus World. – 2006. – Vol. 42. – P. 63–68.

7. Xue, Q. Modified Dyson imaging spectrometer with an aspheric grating surface / Q. Xue // *Optics Communications*. – 2013. – Vol. 308. – P. 260-264.
8. Mouroulis, P. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer / P. Mouroulis, R.O. Green, D.W. Wilson, J.J. Shea, R.O. Green // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(12) – P. 9087-9096
9. Mouroulis, P. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson, J.J. Shea, R.O. Green // *Optical Engineering*. – 2007. – Vol. 46(6) – P. 063001.
10. Hana Ku Optical design, performance, and tolerancing of an Offner imaging Spectrograph / Hana Ku, Seo Hyun Kim, Hong Jin Kong, Jin Ho Lee // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8491. – P. 84910K-1-8.
11. 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.
12. Казанский, Н.Л. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76.
13. 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.