

Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы

Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипов, Н. А. Ивлиев

Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Самара, Россия
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,
Самара, Россия

Рассмотрена мультиапертурная система из гармонических линз разной высоты. Показано что использование такой системы позволяет эффективно формировать утроенное количество спектральных каналов, по сравнению с обычной мультиапертурной системой за счет использования цветной матрицы приведены результаты натурального эксперимента.

Ключевые слова: Гармоническая линза, Мультиапертурная система, Гиперспектрометр.

Цитирование: **Скиданов, Р. В.** Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы / Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипов, Н. А. Ивлиев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 441–445.

Введение

До недавнего времени коммерческие системы изображающей спектроскопии были в основном бортовыми устройствами для космических и летательных аппаратов, которые сложно было использовать на поверхности Земли [1].

В большинстве современных изображающих спектрометров оптическая система, формирующая изображение, и дисперсионный элемент чётко разделены. В качестве дисперсионного элемента в изображающем спектрометре может использоваться как призма, так и дифракционная решётка. При этом спектральное разрешение таких приборов всегда на один два порядка хуже, чем разрешение обычных спектрометров. Связано это, в первую очередь с тем, что в изображающих гиперспектрометрах используются существенно более низкочастотные дисперсионные элементы. Так если число линий на миллиметр в дифракционной решётке обычного спектрометра составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч, то в изображающих гиперспектрометрах обычно используются решётки, в которых не более нескольких десятков линий на миллиметр. Связано это с тем, что в изображающих гиперспектрометрах нежелательно сильно смещать изображение от оптической оси прибора, из-за уширения функции рассеяния точки. Это уширение можно нивелировать за счет использования дифракционных решёток на криволинейных поверхностях, [2]. Но это ведет к необходимости использования дифракционных решёток на криволинейных поверхностях, изготовление которых затруднено по сравнению с плоскими дифракционными решётками. В последнее время наметилась тенденция к разработке

относительно простых по конструкции гиперспектрометров для использования на беспилотных летательных аппаратах, на вращающихся платформах, оптические схемы таких спектрометров представляют собой телескопическую систему с дисперсионным элементом в фокальной плоскости [3–2]. Но, безусловно, самым простым вариантом является использование мультиапертурных систем в сочетании со спектральными фильтрами [6]. В настоящей работе рассматривается мультиапертурная система на основе гармонических линз и цветной светочувствительной матрицы.

1. Расчет элемента на основе матрицы гармонических линз

Согласно [7] для гармонической линзы рассчитанной для работы с длиной волны λ_0 возникает набор длин волн (гармоник), на которых эта линза также строит четкое изображений. Эти длины волн определяются по формуле

$$\lambda_k = \frac{m\lambda_0}{k} \quad (1)$$

где m – коэффициент показывающий во сколько раз, высота микрорельефа гармонической линзы больше, чем высота микрорельефа дифракционной линзы на длину волны λ_0 . Коэффициент m можно вычислить по формуле

$$m = \frac{h \cdot (n - 1)}{\lambda_0} \quad (2)$$

где h – высота микрорельефа, n – показатель преломления. Для линзы с высотой микрорельефа 6 мкм и $\lambda_0 = 550$ нм $m = 5$, согласно (1) у этой линзы есть еще две гармоники, которые попадают в видимый диапазон, $\lambda_4 = 687$ нм, $\lambda_6 = 458$ нм. Таким образом, естественным путем получается три спектральных канала, один из них регистрируется синими пикселями, один – зелеными, и один – красными. Для получения большего количества каналов нужно использовать мультиапертурную систему, в которой гармонические линзы имеют разную высоту микрорельефа. Поскольку 6мкм является практически предельной высотой для используемой технологии прямой лазерной записи, то высоту микрорельефа придется уменьшать. Если рассматривать простейшую мультиапертурную систему из 4 линз, то для обеспечения примерно равномерного расположения спектральных каналов надо подобрать высоты исходя из пересечения длиной волны λ_6 границы видимого диапазона. Расчет по формулам (1) и (2) дает значение высоты микрорельефа 5,22мкм ($\lambda_0 = 480$ нм, гармоника $\lambda_4 = 600$ нм). Оставшиеся две линзы формируем с высотами 5,48мкм ($\lambda_0 = 500$ нм, гармоника $\lambda_4 = 625$ нм, гармоника $\lambda_6 = 417$ нм) и 5,74 мкм ($\lambda_0 = 528$ нм, гармоника $\lambda_4 = 660$ нм, гармоника $\lambda_6 = 440$ нм). Полный набор центральных длин волн спектральных каналов приведен в таблице 1.

Таблица 1. Центральные длины волн

Номер канала	Центральная длина волны (нм)	Ширина спектрального канала (нм)
1	400	17
2	417	23
3	440	18
4	458	22
5	480	20
6	500	28
7	528	22
8	550	50
9	600	25
10	625	35
11	660	27
12	687	13

Как видно из таблицы 1 получилось 12 спектральных каналов расположенных почти равномерно с закономерным разрывом между 550нм и 600нм. Этот разрыв можно при большем количестве линз заполнить за счет введения линз, у которых гармоника λ_6 уйдет за границы видимого диапазона в ультрафиолетовую область.

2. Изготовление и эксперимент

Для обеспечения точности формирования микрорельефа гармонические линзы для мультиапертурной системы формируются на одной подложке. На рис. 1 представлена фазовая функция четырехлинзовой системы. Размер всей области записи 6,5*6,5мм, диаметр апертуры линз 2мм.

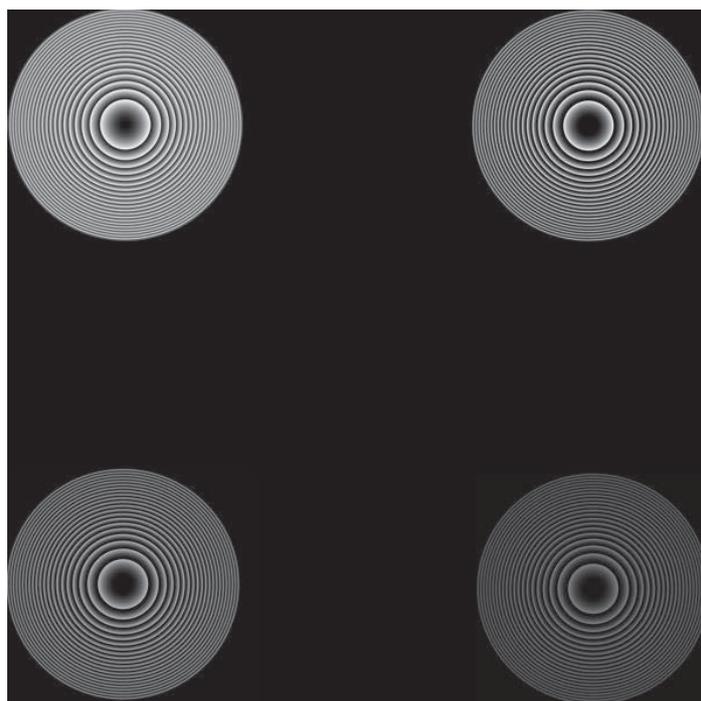


Рис. 1. Фазовая функция четырехлинзовой системы

Мультиапертурная система была изготовлена на резисте методом прямой лазерной записи. Для эксперимента использовалась цветная камера Basler acA 1920-40uc.

К сожалению, одновременная съемка всеми четырьмя линзами требует ввода в оптическую систему специальной бленды для разделения областей на матрице, которую пока не удалось изготовить, поэтому первый эксперимент был проведен с отдельной съемкой, для этого на мультиапертурную систему накладывалась диафрагма, которая оставляла только открытой одну из линз. На рис.2 представлены результаты первого эксперимента, в котором был снят участок светотехнической таблицы с четырьмя цветными квадратами.

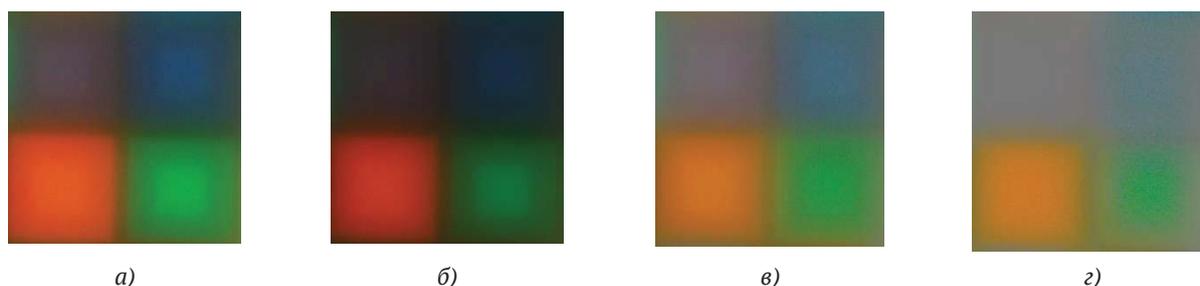


Рис. 2. Изображения участка светотехнической таблицы, полученные в мультиапертурной системе каждой из 4 линз

Интенсивности для каждого квадрата измерялись путем разделения цветовых каналов и нормировались на кривую чувствительности каждого типа пикселей. Потом все это сводилось в спектральное распределение. На рис.3 представлен спектр красного квадрата.

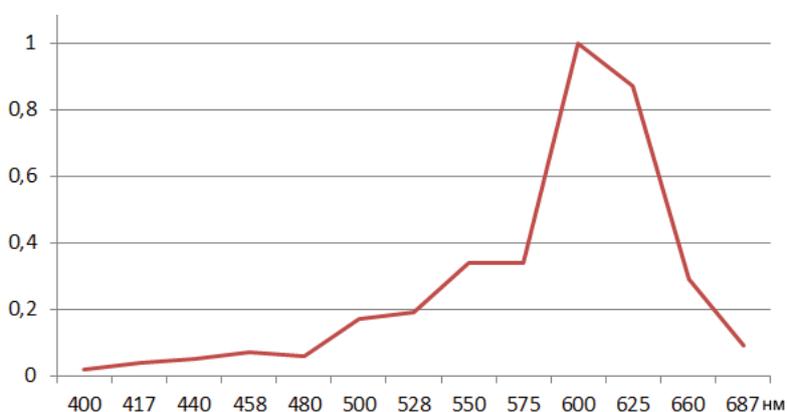


Рис. 3. Полученное спектральное распределение для красного квадрата на рис. 2

Как видно из рис. 3 получен вполне ожидаемый результат с пиком в красной области спектра, что позволяет говорить о работоспособности рассматриваемой системы.

Заключение

Проведенный эксперимент показывает работоспособность предложенной мультиапертурной системы. Однако надо рассматривать полученные результаты как сугубо предварительные. Для практического использования мультиапертурная система должна быть в виде матрицы, минимум, 4*4 линзы. Кроме этого необходимы более точные данные о спектральной

чувствительности пикселей цветной матрицы. В рамках этой работы они были заданы довольно приблизительно на основе графического представления, взятого с сайта производителя. В целом же возможность формирования одной линзой сразу трех спектральных каналов позволяет получить компромиссное решение с удовлетворительным спектральным и пространственным разрешением.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021–2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области" в части расчета и при поддержке гранта РФФИ № 20-69-47110 в части эксперимента.

Список источников

- [1] **Robles-Kelly, A.** Imaging spectroscopy for scene analysis: Challenges and opportunities / A. Robles-Kelly, B. Simpson-Young // IET Computer Vision. – 2013. – Vol. 7(6). – P. 467-477.
- [2] **Kwo, D.** Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system / D. Kwo, G. Lawrence, and M. Chrisp // Proc. SPIE. – 1987. – Vol. 818. – P. 275-279.
- [3] **Cai, F.** Pencil-like imaging spectrometer for biosamples sensing / F. Cai, D. Wang, M. Zhu, S. He // Biomedical optics express. – 2017. – Vol. 8(12). – P. 5427-5436.
- [4] **Zhang, H.** Development of a Portable Field Imaging Spectrometer: Application for the Identification of Sun-Dried and Sulfur-Fumigated Chinese Herbs / H. Zhang, T. Wu, L. Zhang, P. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 70(5). – P. 879-887.
- [5] **Wu, T.** Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy for Analysis of Ancient Paintings / T. Wu, G. Li, Z. Yang, H. Zhang, Y. Lei, N. Wang, L. Zhang // Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 71(5). – P. 977-987.
- [6] **Mu, T.** Compact snapshot optically replicating and remapping imaging spectrometer (ORRIS) using a focal plane continuous variable filter / T. Mu, F. Han, D. Bao, Ch. Zhang, R. Liang // Optics Letters. – 2019. – Vol. 44(5). – P. 1281-1284.
- [7] **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney,; G.E. Sommargren, Applied Optic – 1995. – Vol. 34. P. 2469-2475.

An array of harmonic lenses as a dispersion element of a hyperspectrometer based on a color photosensitive matrix

R.V. Skidanov^{1,2}, V. A. Blank^{1,2}, S. V. Ganchevskaya^{1,2}, V. V. Podlipnov^{1,2}, N. A. Ivliev^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Самара, Россия

² Samara National Research University, Samara, Russia

We have considered a multi-aperture system of harmonic lenses of different heights. We have shown that the use of such a system makes it possible to effectively form a tripled number of spectral channels, compared with a conventional multi-aperture system due to the use of a color matrix. We have given the results of a full-scale experiment.

Keywords: Harmonic lens, Multi-aperture system, Hyperspectrometer.