

Ультракомпактный изображающий спектрометр на основе кольцевых структур

М.А. Родионова¹, Р.В. Скиданов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Объектом исследования данной работы является объектив с кольцевой структурой, который в перспективе позволит получить ультракомпактный гиперспектрометр. Данная конструкция основана на кольцевой отражающей гармонической линзе. Произведен расчет распространения лучей внутри объектива на основе принципов геометрической оптики с искусственным вводом дифракционной дисперсии, получена функция рассеяния точки.

1. Введение

В наш информационный век мобильные устройства стали необходимым атрибутом жизни обычного человека. Постоянное развитие технологий инициирует появление в таких устройствах все большего количества новых сенсоров, и на базе новых сенсоров появляется огромное количество приложений, существенно расширяющих возможности человека в мониторинге окружающей среды. Таким образом, актуальной является задача расширения функциональных возможностей мобильных устройств за счет разработки новых типов сенсоров. Одно из важнейших направлений – спектроскопия и разработка компактных изображающих спектрометров. В настоящее время появилось много спектрометров в виде насадок на смартфон[1-3], позволяющих с достаточной точностью проводить спектральный анализ. Однако часто для проведения обширного исследования простого спектрометра недостаточно, и в таком случае на помощь приходит изображающий спектрометр (гиперспектрометр), который может дать более полный анализ, в том числе возможность выбора спектрального слоя для текстурного анализа. Такой прибор позволяет формировать гиперспектральное изображение, показывающее распределение интенсивности в зависимости от пространственных координат и длины волны. Соответственно, для таких задач оптическая схема гиперспектрометра должна быть предельно компактной, в идеале соизмеримой с размером смартфона. В основе компактных гиперспектрометров должны лежать схемы, позволяющие получить гиперспектральные изображения с минимальной потерей качества.

В настоящем исследовании мы будем рассматривать оптическую схему, в основе которой будет лежать гармоническая линза с кольцевой апертурой[4]. Рассматриваемая система дает возможность получить гиперспектрометр с почти плоской конфигурацией (толщина 2-5мм, диаметр 25мм), что идеально подходит для использования с мобильными устройствами.

2. Исследуемая схема на основе кольцевой гармонической линзы

В качестве рабочего прототипа рассмотрим схему Кассегрена на рисунке 1. Классическая схема Кассегрена устраняет только сферическую aberrацию, а внеосевые aberrации, особенно кома, портят изображения уже при небольших полевых углах. Главное зеркало большего диаметра (вогнутое) отбрасывает лучи на вторичное зеркало, которое выпуклое меньшего диаметра (обычно гиперболическое).

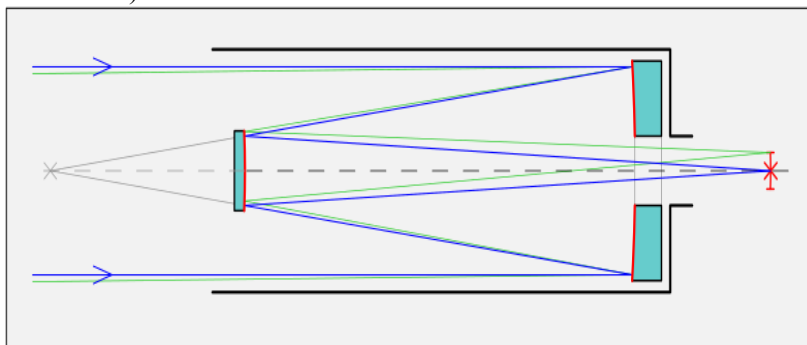


Рисунок 1. Схема Кассегрена.

Наш гиперспектрометр разработан на основе схемы Кассегрена, и главная модификация – большое количество переотражений внутри системы, что позволяет получить изображение, соответствующее длиннофокусному объективу при толщине оптической схемы всего в несколько миллиметров.

В гиперспектрометре расположение структурных элементов будет следующим: на входе пучок попадает на гармоническую линзу с дифракционной решеткой, которая раскладывает его на компоненты длин волн. Похожий объектив без дифракционной решетки исследовали авторы статьи [4]. На рисунке 2 основная структурная схема объектива, с которой мы и будем в дальнейшем работать.

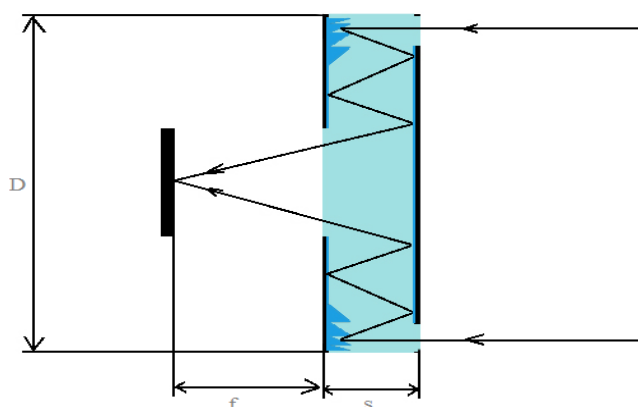


Рисунок 2. Исследуемая схема на основе гармонической линзы.

Для расчета структуры объектива использовались формулы задания структуры отражающей гармонической линзы:

$$h(r, \lambda_0) = \frac{1}{2n} \text{MOD}_{m\lambda_0} \left(\frac{k}{2f} r^2 \right), m = 1, 2, 3, 4 \dots,$$

где λ_0 – центральная расчетная длина волны, m – число гармоник, операция $\text{MOD}_{m\lambda_0}$ означает, что максимальная разность хода лучей в этой линзе $m\lambda_0$.

Также для расчета оптимального угла падения на объектив использовалась формула ограничения на максимальную ширину кольцевой апертуры:

$$\Delta r = s \frac{D}{2f},$$

где s – толщина линзы, а D – диаметр линзы. В отличие от [4], в которой авторы рассматривали гармоническую линзу для одной длины волны в настоящей работе учитывается дисперсия этой линзы.

3. Результаты работы

На начальном этапе выполнения данной работы смоделирована система, представленная на рисунке 2. Фазовая функция гармонической линзы меняется с помощью параметров, некоторые варианты представлены на рисунке 3.

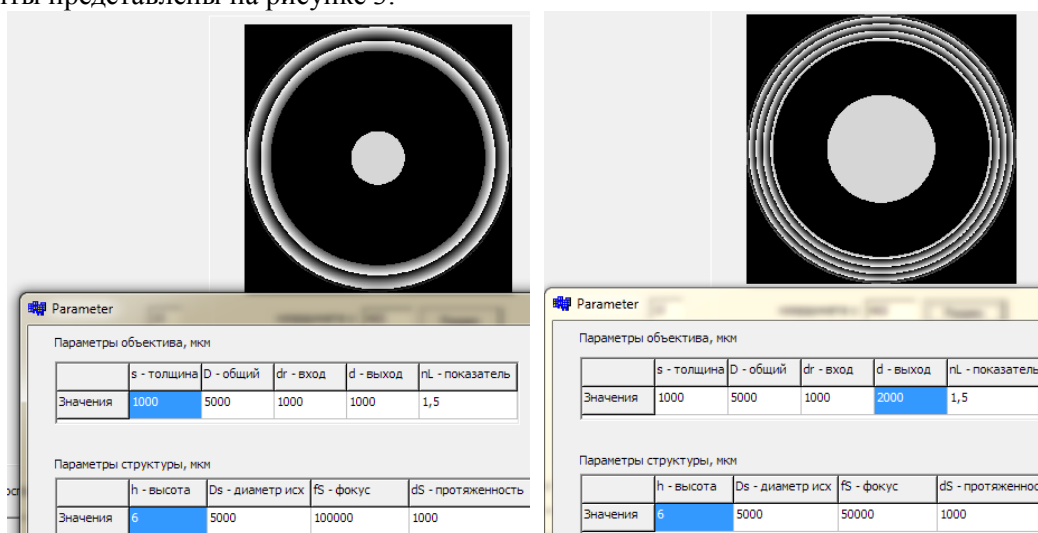


Рисунок 3. Вид структуры.

Результаты расчета трассировки пучка лучей через объектив можно увидеть на рисунке 4. Из этого рисунка видно, что модель системы качественно совпадает с результатами [4].

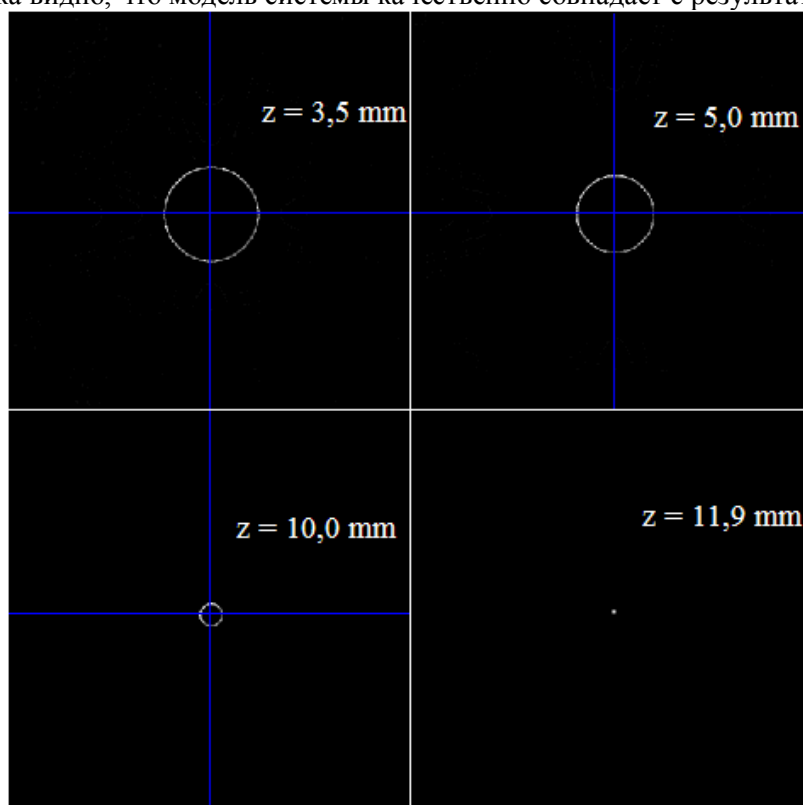


Рисунок 4. Нормальное падение лучей на систему.

4. Заключение

Методом трассировки пучка лучей промоделирована базовая оптическая схема для гиперспектрометра на основе кольцевой гармонической линзы, с учетом ее дисперсии. Получено качественное совпадение результатов с [4]. Что дает возможность моделирования системы для белого света.

5. Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-20045-мк).

6. Литература

- [1] Yang, C. Proposal and demonstration of a spectrometer using a diffractive optical element with dual dispersion and focusing functionality / C. Yang, P. Edwards, K. Shi, Z. Liu // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(11). – P. 2023-2025.
- [2] Yaokai, L. Spectral Calibration of Hyperspectral Data Observed From a Hyperspectrometer Loaded on an Unmanned Aerial Vehicle Platform / L. Yaokai, W. Tianxing, M. Lingling, W. Ning // *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 7(6). – P. 2630-2638.
- [3] Zhang, C. G-Fresnel Cellphone Spectrometer / C. Zhang, G. Cheng, P. Edwards, M.-D. Zhou, S. Zheng, Z. Liu // *Lab on a Chip*. – 2016. – Vol. 16(2). – P. 246-150.
- [4] Скиданов, Р.В. Гармоническая линза с кольцевой апертурой / Р.В. Скиданов, Ю.С. Стрелков, С.Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 842-847. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.

Ultracompact imaging spectrometer based ring type structures

M.A. Rodionova¹, R.V. Skidanov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The object of research is lens with a ring type structure which will allow get an ultracompact hyperspectrometer in the future. This construct is based on a reflective harmonic lens. The propagation of rays inside the lens was calculated based on the principles of geometric optics with artificial input of diffraction dispersion; the point scattering function was obtained.