

Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов

Д. М. Ахметов^{1,2}, Э. Р. Муслимов¹, Д. Ю. Харитонов^{1,2}, И. А. Гуськов^{1,2}, Н. К. Павлычева¹,
А. Р. Гильфанов^{1,2}, А. И. Терентьев¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени
А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

² АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Россия

Композитный голограммный оптический элемент представляет собой голограмму, записанную шивкой нескольких субапертур. Глубина модуляции показателя преломления, наклон полос и пространственная частота голограммы могут локально изменяться в каждой из субапертур для соответствия меняющимся условиям воспроизведения голограммы. В настоящей работе рассматривается реализация и анализ двух алгоритмов расчета дифракционной эффективности (ДЭ) в схемах с использованием голограммных оптических элементов. Первый алгоритм расчета основывается на последовательном разбиении голограммного элемента. Второй алгоритм расчета основывается на осреднении локально оптимизируемых параметров голограммы. Для реализации этих алгоритмов используется программная среда Zemax, с учетом необходимости использования считывания и изменения параметров структурной голограммы в цикле используется пользовательская библиотека dll. В качестве примера рассматривается оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области. Рабочий спектральный диапазон составляет 40 нм и центрирован относительно длины волны излучения стандартного лазерного источника 850 нм. Числовая апертура в пространстве предметов составляет 0,14. Схема работы оптической системы состоит из коллиматора, двух объемно-фазовых пропускающих голограммных решеток, камерного объектива и фотоприемника. В качестве коллимирующего объектива выбран двухлинзовый склеенный компонент с фокусным расстоянием 100 мм, ахроматизированный для рабочей спектральной области. В качестве камерного объектива используется объектив-триплет с фокусным расстоянием 100 мм. В качестве второй решетки предполагается использовать композитный голограммный оптический элемент. Его использование позволит компенсировать изменение угла падения по площадке решетки при ее установке в диспергированном пучке, и тем самым значительно повысить характеристики оптической системы.

Ключевые слова: Голограммная дифракционная решетка, Композитный голограммный элемент, Дифракционная эффективность, Ближний инфракрасный диапазон.

Цитирование: Ахметов, Д. М. Сравнительный анализ алгоритмов расчета оптических систем с использованием композитных голограммных оптических элементов / Д. М. Ахметов, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, И. А. Гуськов, Н. К. Павлычева, А. Р. Гильфанов, А. И. Терентьев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 126–131.

Введение

Проектирование оптико-электронных приборов с передовыми характеристиками в части чувствительности и разрешающей способности требует применения оптических систем с

высокой светосилой, широким полем зрения и малым изменением ключевых оптических характеристик (увеличения, геометрических aberrаций, потерь на отражение на поверхностях, потерь излучения из-за поглощения и рассеяния в материале оптических деталей, дифракционной эффективности и т.д.) по апертуре и полю зрения.

Проблема создания оптических систем с перечисленными характеристиками заключается в их ограничении рядом физических и технологических факторов, а также несовершенством существующих алгоритмов расчета и оптимизации.

В рамках работы предлагается реализация и анализ двух алгоритмов расчета дифракционной эффективности в схемах с использованием композитных голограммных оптических элементов (КГОЭ)[1]. В качестве примера рассматривается оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области.

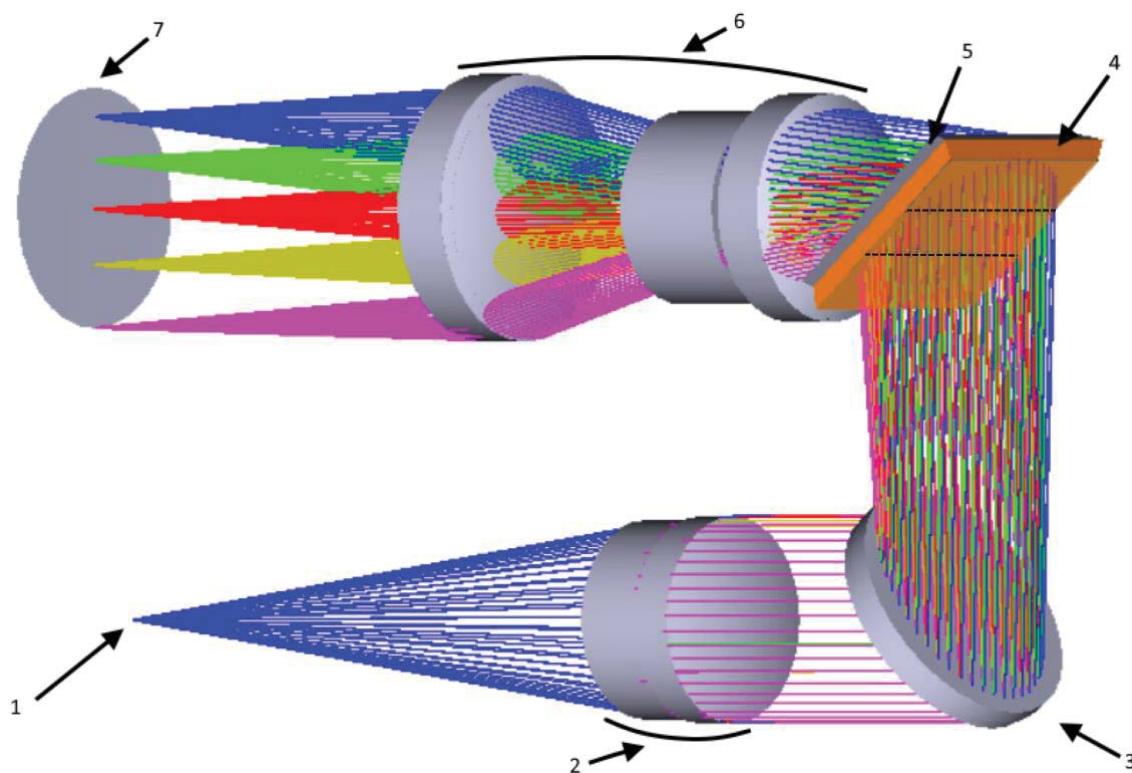
Моделирование оптической схемы

В качестве примера используется оптическая схема спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области [2]. Рабочий спектральный диапазон составляет 840 нм и центрирован относительно длины волны излучения стандартного лазерного источника 850 нм. Числовая апертура в пространстве предметов составляет 0,14. Общий вид оптической схемы представлен на рисунке 1, на схеме обозначены: 1 — оптоволоконный вход, 2 — коллимирующий объектив, 3 — первая решетка, 4 — субапертура, 5 — вторая, 6 — камерный объектив, 7 — плоскость изображения спектра [3].

Алгоритм расчета, основанный на последовательном разбиении элемента

Алгоритм расчета состоит из следующих пунктов:

1. Расчет оптимальных значений угла наклона полос, амплитуды модуляции и толщины структуры голограммы по условию Брэгга для одной длины волны.
2. Внесение данных переменных, найденных из уравнения Брэгга, в модель оптической системы.
3. Внедрение в программную среду Zemax пользовательской библиотеки dll и макроса zpl. Определение границ субапертур.
4. Составление КГОЭ из субапертур, делящие поле записи на 3 части. Следующие операции повторяются для каждой длины волны.
5. Проводится пробная трассировка лучей.
6. Присваивание длин волн весовых коэффициентов пропорциональных количеству лучей проходящих через данную субапертуру.
7. Оптимизация оптической схемы с учетом требований максимизации взвешенной ДЭ[4].
8. Использование пользовательского макроса для получения результата распределения эффективности по длинам волн и по площадкам всех субапертур.



1 – оптоволоконный вход, 2 – коллимирующий объектив, 3 – первая решетка, 4 – субапертура, 5 – вторая, 6 – камерный объектив, 7 – плоскость изображения спектра

Рис. 1. Общий вид оптической схемы

Рассмотрим оптические характеристики системы, достигаемые при использовании композитной голограммы, разбитой на 3 равные зоны. Примеры распределения ДЭ по зрачку и полю зрения, рассчитанного по описанной выше методике для длин волн 830-870 нм, показаны на Рис.2.

Параметры голограммы полученные для каждой субапертуры в результате оптимизации сведены в таблицу 1. С учетом числа лучей прошедших через субапертуры мы получаем взвешенную ДЭ 76.1%,63.5% и 40.1% для длины волны 830,850 и 870 соответственно. Преимуществом ДЭ для контрольных длин волн соответственно составляет в 0.995,2 и 5.1 раз.

Таблица 1. Параметры субапертур

| Субапертура | Угол наклона $i_1, ^\circ$ | Угол наклона $i_2, ^\circ$ | Толщина, мкм | Глубина модуляции | Результат ДЭ, % | | | Число лучей | | |
|-------------|----------------------------|----------------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | | | | | 830 нм | 850 нм | 870 нм | 830 нм | 850 нм | 870 нм |
| 1 | -25 | 25,3 | 6,4 | 0,168 | 70,5 | 63,6 | 47,9 | 294 | 605 | 1099 |
| 2 | -24,9 | -24,2 | 3,4 | 0,1 | 78,3 | 69,5 | 30 | 946 | 1120 | 842 |
| 3 | -25 | 25,3 | 8,3 | 0,05 | 75,5 | 33 | 0 | 701 | 216 | 0 |

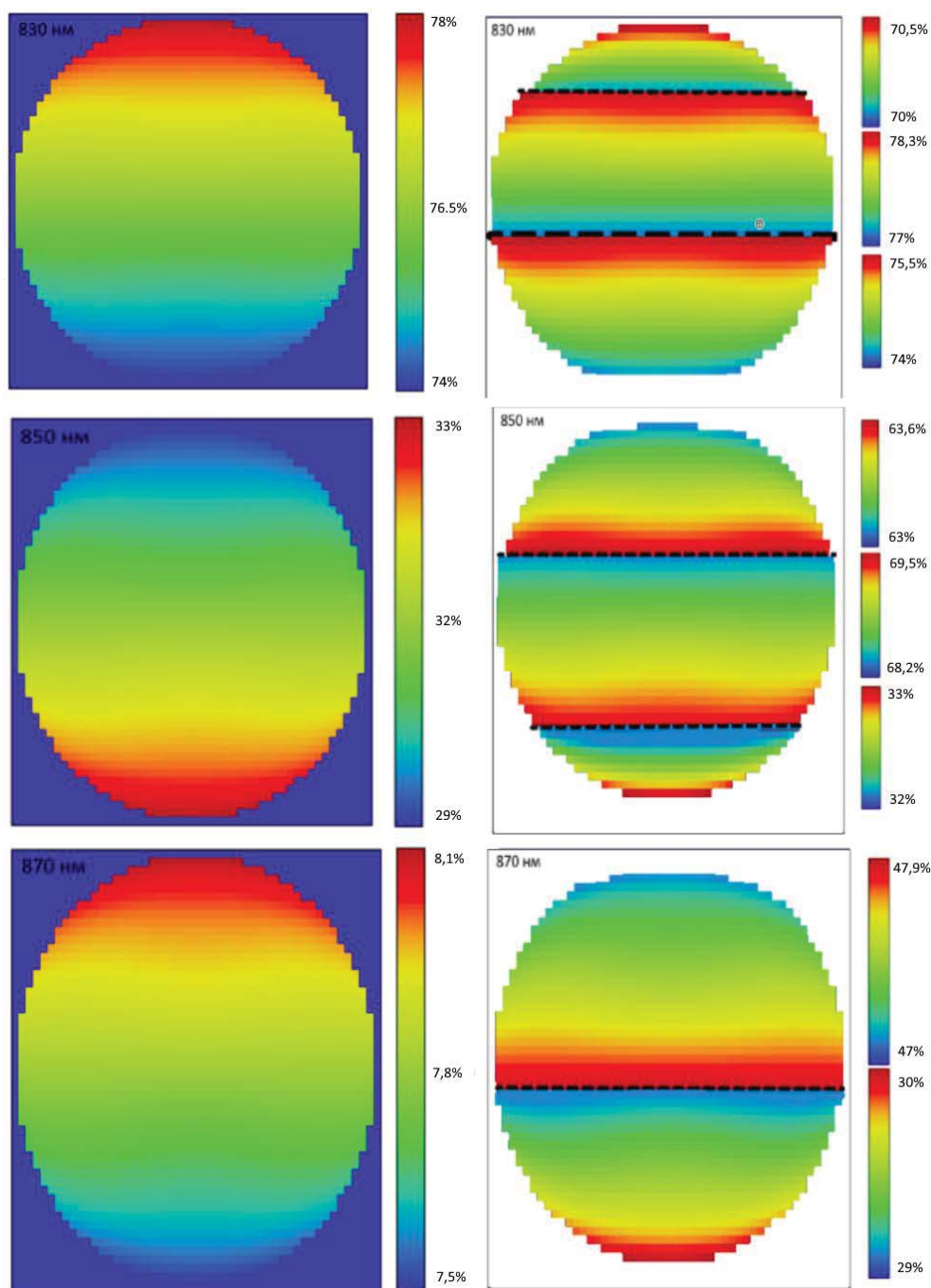


Рис. 2. Пример распределения дифракционной эффективности:слева - без использования КГОЭ; справа – с использованием КГОЭ.

Алгоритм расчета основывается на осреднении параметров

Алгоритм расчета состоит из следующих пунктов:

1. Расчет оптимальных значений угла наклона полос, амплитуды модуляции и толщины структуры голограммы по условию Брэгга для одной длины волны.
2. В цикле сканируется площадка голограммы. Для массива малых решёток 1.6x1.6мм рассчитывается оптимальные значения параметров по алгоритму, описанному выше.
3. Производится качественный анализ полученного пространственного распределения оптимальных параметров и определение числа и формы субапертур.
4. Усредняются значения параметров голограммы в пределах каждой из субапертур.
5. Задаются параметры субапертур и проводится поверочный расчет.

На рисунке 3 показаны распределения оптимальных значений параметров голограммы, полученные с помощью данного алгоритма. Возможное разбиение на субапертуры показано пунктиром на Рис.3,А.

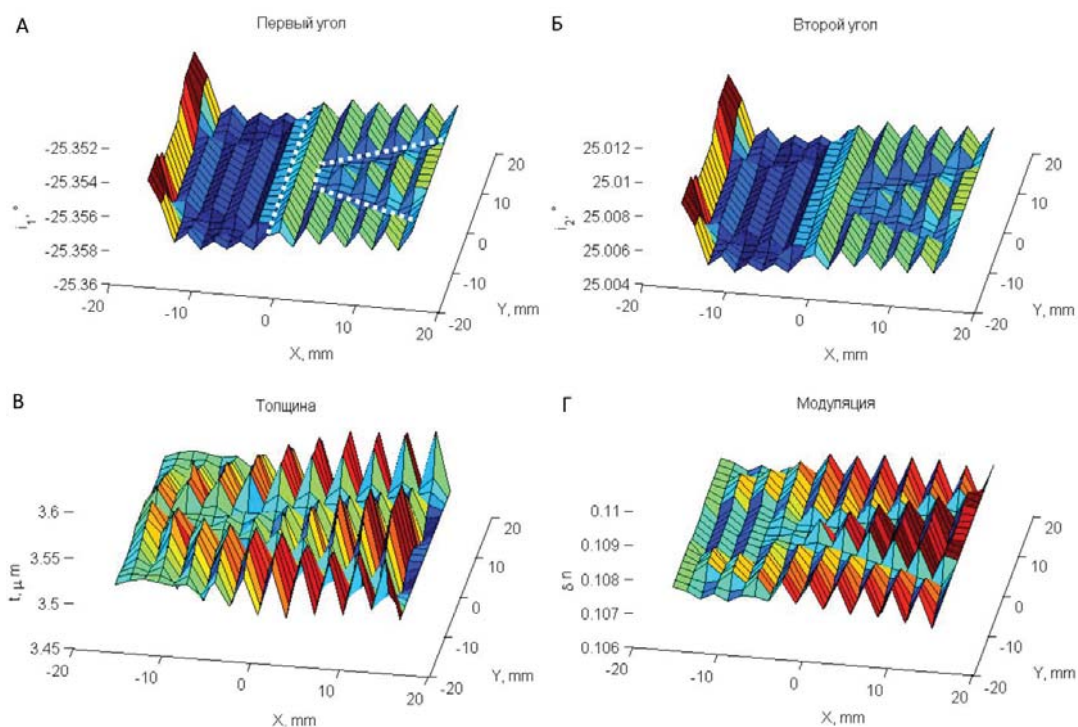


Рис. 3. Пример пространственного распределения оптимальных значений параметров голограммы: А – угол падения первого пучка в схеме записи, Б - угол падения второго пучка в схеме записи, В – толщина структуры голограммы, Г – амплитуда модуляции показателя преломления.

Заключение

На примере спектрографа с высокой дисперсией для ближней ИК-области продемонстрированы преимущества составной голограммы. Суть состоит в более равномерном распределении дифракционной эффективности по полю и рабочей полосе спектра. Для наихудшего положения на краю спектрального диапазона прирост ДЭ достигает 5 раз для композитной голограммы с простейшей конфигурацией, состоящей из субапертур 3×1 . Полученный результат наглядно демонстрирует эффективность первого алгоритма.

Второй алгоритм является более гибким, поскольку позволяет более эффективно определять количество и форму субапертур, но требует значительно больший объем вычислений, так как подразумевает нахождение оптимальных параметров для большого количества точек.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-79-00082.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Muslimov E. R. et al. Concept of composite holographic optical elements // Photonics Russia. – 2020. – Т. 7. – С. 586-599.
- [2] **Nureev I.I.** Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme [Text]/ Nureev I.I., Morozov O.G., Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A., Muslimov E.R., Pavlycheva N.K.//Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807 – P. 98070Y.
- [3] **Muslimov E.** Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach[Text]/ Muslimov E., Nureev I., Morozov O., Kuznetsov A., Faskhutdinov L., Sakhabutdinov A., Pavlycheva N.// Optical engineering. – 2018. – Vol.57.№.12.
- [4] **Kogelnik H.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P.2909–2947. [10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x)

Comparative analysis of algorithms for design of optical systems using composite hologram optical elements

D. M. Akhmetov^{1,2}, E. Muslimov¹, D. Kharitonov^{1,2}, I. Guskov^{1,2}, N. Pavlycheva¹, A. Gilfanov^{1,2}, A. Terentyev¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia

² JSC “Scientific-Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russia

A composite holographic optical element represents a hologram recorded by stitching of several elementary fields or zones. The refraction index modulation, the fringes tilt angle and the spatial frequency of the hologram can be locally changed in each of the elementary fields to match the changing reconstruction conditions of the hologram. In this paper, we consider the implementation and analysis of two algorithms for the diffraction efficiency optimization in optical designs, which use such holographic optical elements. The first computation algorithm is based on a subsequent division of the hologram element. The second computation algorithm is based on averaging of locally optimized hologram parameters. To implement these algorithms, the Zemax software environment is used. Taking into account the need to read out and change in a loop the hologram structure parameters, we use a custom dll library. As an example, optical design of a high-dispersion spectrograph for the near-IR region is considered. The working spectral range is 40 nm-wide and is centered with respect to the emission wavelength of a standard 850 nm laser source. The numerical aperture in the objects space is 0.14. The optical system consists of a collimator, two volume-phase transmission holographic gratings, a camera lens and a photodetector. A two-lens cemented component with the focal length of 100 mm, achromatized for the working spectral region, was chosen as the collimating objective. A triplet lens with the focal length of 100 mm is used as the camera lens. A composite holographic optical element is supposed to be used as the second grating. Its use will make it possible to compensate for the angle of incidence change across the grating area when it is installed in a dispersed beam, and thereby to improve significantly the key characteristics of the optical system.

Keywords: Holographic diffraction grating, Composite holographic element, Diffraction efficiency, Near infrared range.