

66. Комплексное использование методов анализа связанных волн и трассировки лучей при проектировании спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками

Э. Р. Муслимов^{1, 2}, Н. К. Павлычева¹

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

² Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France

В работе рассматриваются принципы проектирования спектрографов с объемно-фазовыми голограммными дифракционными решетками. Принципы базируются на комплексном использовании методов анализа связанных волн и трассировки лучей для расчета и моделирования дифракционной эффективности и спектрального разрешения, соответственно. Показано, что использования предложенной системы принципов позволяет построить новые методики расчета, позволяющие одновременно повысить обе группы характеристики, а также найти новые схемные решения спектрографов. Приведен ряд примеров использования новых решений при разработке спектрографов для промышленности и научных исследований.

Ключевые слова: Объемно-фазовые голограммные дифракционные решетки, Спектрографы, Дифракционная эффективность, Спектральное разрешение, Методики проектирования.

Цитирование: Муслимов, Э. Р. Комплексное использование методов анализа связанных волн и трассировки лучей при проектировании спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками / Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 365–373.

Введение

В процессе проектирования спектрографов часто возникает ситуация, когда требование одновременного повышения нескольких оптических характеристик ведет к противоречию. В частности, можно выделить следующие типичные противоречия:

1. Требование одновременного повышения спектральной разрешающей способности и пропускания оптического тракта в широком спектральном диапазоне.
2. Требование повышения спектральной разрешающей способности в узком спектральном диапазоне при одновременном уменьшении габаритов и сохранении высокого пропускания.
3. Требование одновременного повышения относительного отверстия системы и ее спектральной разрешающей способности.

Подобные противоречия возникают для приборов различных классов, используемых в разных прикладных областях — астрономии, космических исследованиях, ядерной и термо-ядерной энергетике, для атомного эмиссионного анализа в металлургии и химической промышленности, для исследования спектров Рамановского рассеяния и флуоресценции в биологии и медицине, для исследования источников излучения и других задач [1-9].

В контексте обозначенных противоречий наибольшими перспективами обладают решения на базе объемно-фазовых голограммных решеток. Такие решетки могут выполняться на поверхности любой формы и/или размера, отличаются низким уровнем рассеянного света и отсутствием паразитных изображений, широкими коррекционными возможностями. Кроме того, объемно-фазовые решетки могут иметь высокую дифракционную эффективность (ДЭ), спектральную зависимость которой можно сравнительно легко изменять при записи, а также обладают высокой угловой и спектральной селективностью.

Одной из основных причин, препятствующих созданию новых спектрографов с улучшенными характеристиками, реализующих преимущества технологии голограммных решеток, является принципиальное различие подходов к расчету и моделированию спектрального разрешения и дифракционной эффективности. Соответственно, в рамках данной работы рассматривается комплексное применение двух групп методов расчета для проектирования спектрографов, обеспечивающее одновременное повышение спектрального разрешения и энергетических характеристик.

1. Принципы проектирования

Известны методы, позволяющие моделировать и оптимизировать показатели качества изображения спектральных приборов, в частности, спектральное разрешение. Большинство из них опирается на процедуру трассировки лучей. В простейших случаях уравнения трассировки могут быть записаны в общем случае и затем использованы при формулировании аналитической методики расчета. В общем случае используются численные методы трассировки, реализованные во множестве прикладных программ для расчета оптических систем [10].

Аналогично, ДЭ голограммной решетки может быть рассчитана и оптимизирована с использованием одной из известных методик. Для объемно-фазовой решетки при выполнении ряда допущений можно использовать аналитические соотношения теории связанных волн Когельника [11]. В общем же случае, задача вычисления ДЭ требует использования одного из точных численных методов, например, строгого анализа связанных волн, конечных разностей во временной области или С-метода. В рамках данной работы использовался метод строгого анализа связанных волн (RCWA) [12].

Ввиду принципиальных различий в подходах к моделированию показателей спектрального разрешения и ДЭ существующие методики проектирования не позволяют добиться их одновременного повышения. На Рисунке 1 методы, используемые при моделировании и проектировании спектрографов, представлены в виде диаграммы. Предлагаемый новый подход



Рис. 1. Диаграмма применения методов расчета и оптимизации при проектировании спектрографов

к проектированию спектрографов основан на комплексном применении рассмотренных методов расчета для достижения системного эффекта. Можно представить вводимые в процесс проектирования изменения как дополнительные внутренние связи (обозначены зелеными линиями на диаграмме). Им соответствуют следующие принципы проектирования:

1. Использование результатов аналитического расчета и численного моделирования дифракционной эффективности при трассировке лучей и анализе качества изображения.

2. Использование трассировки главного луча при расчете и оптимизации дифракционной эффективности.

3. Использование результатов трассировки реальных лучей с помощью численных методов при расчете и оптимизации дифракционной эффективности.

4. Сочетание аналитических и численных методов при оптимизации отдельных оптических характеристик для расширения области поиска при оптимизации.

5. Внесение изменений в принципиальную схему спектрографа с учетом возможности моделирования таких сложных эффектов как взаимное влияние компонентов составного диспергирующего устройства, спектральная и угловая селективность, пространственное изменение ДЭ и др.

Применение описанных здесь основных принципов проектирования для выбранных ранее типичных противоречий подразумевает разработку конкретных методик проектирования. Далее описываются методики расчета и моделирования, построенные на базе предложенных принципов и конкретные технические решения.

2. Спектрограф с каскадным диспергирующим устройством

Предложенные принципы реализованы в оптической схеме спектрографа с каскадным диспергирующим устройством, состоящим из нескольких узкополосных объемно-фазовых дифракционных решеток, устанавливаемых друг за другом и формирующих спектральные

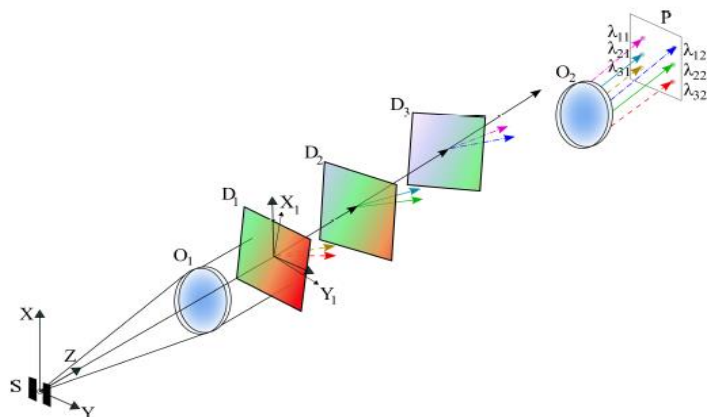


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема на основе каскада объемно-фазовых решеток

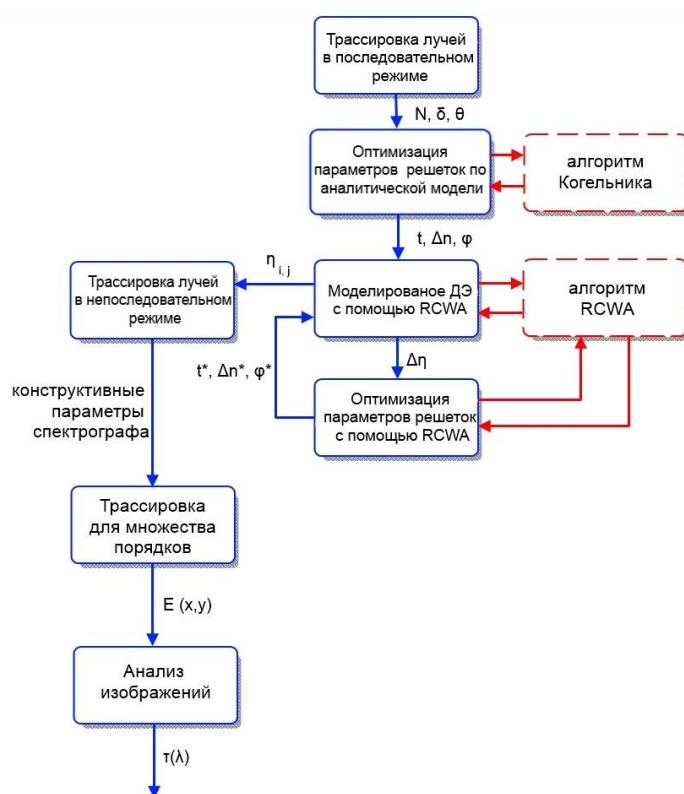


Рис. 3. Алгоритм расчета и моделирования спектрографа с каскадным диспергирующим устройством

изображения в заданных диапазонах на едином фотоприемнике [13]. Каждая из решеток такого каскада формирует изображение спектра в заданном диапазоне и практически не влияет на распространение остальных спектральных составляющих излучения. Принципиальная оптическая схема спектрографа показана на рисунке 2.

Методика расчета и моделирования такой схемы подразумевает использование метода RCWA при вычислении дифракционной эффективности и трассировки лучей в непоследовательном режиме для учета разделения порядков и вторичных отражений. Соответствующий алгоритм представлен на рисунке 3. Результаты трассировки лучей в последовательном ре-

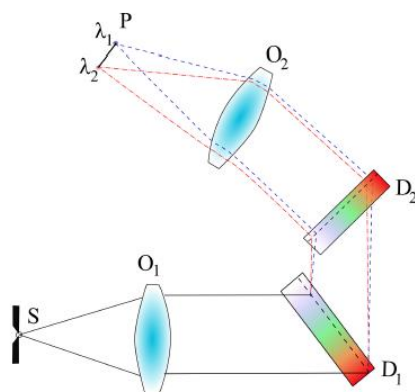


Рис. 4. Принципиальная схема построения спектрографа с высокой угловой дисперсией на базе пары пропускающих решеток

жиме средствами Zemax формируются подпрограммой-макросом в выводной файл и используются при расчете ДЭ методом RCWA в среде Matlab. Полученные значения ДЭ для нескольких порядков дифракции используются при трассировке лучей в непоследовательном режиме Zemax. Разработаны программные средства, реализующие передачу и обработку данных согласно алгоритму.

На базе предложенного принципа построения разработана оптическая схема астрономического спектрографа с каскадным диспергирующим устройством для видимого диапазона спектра 430–680 нм. Диспергирующее устройство состоит из трех объемно-фазовых решеток для диапазонов 430–513 нм («синяя»), 513–597 нм («зеленая») и 597–680 нм («красная»). Каждая из решеток наносится на плоскопараллельную подложку; центрирование и разделение спектральных изображений достигается за счет выбора взаимного положения подложек. В качестве коллимирующего и камерного объективов использованы серийные объективы «Таир-11» ($f = 135$ мм, 1:2,8). С помощью компьютерного моделирования показано, что схема может обеспечивать спектральную разрешающую способность 1553–5124 при пропускании до 53 %.

На базе разработанной оптической схемы совместно с САО РАН (Н. Архыз) создан лабораторный прототип спектрографа [14]. Экспериментально продемонстрирована низкая — не выше 0,5 %, интенсивность паразитных изображений, сравнительно высокий коэффициент пропускания — до 55 %, повышенное спектральное разрешение до 4100.

3. Спектрограф с высокой угловой дисперсией

Другим приложением предложенных принципов является разработка компактного узкополосного спектрографа с высокой угловой дисперсией [15]. В таком спектрографе используется диспергирующее устройство на базе пары объемно-фазовых голограммных решеток (Рисунок 4). Такое решение позволяет значительно увеличить дисперсию и спектральное разрешение при малых габаритах спектрографа и обеспечить высокое пропускание. При этом конструкция спектрографа отличается простотой, а используемые элементы высокой технологичностью.

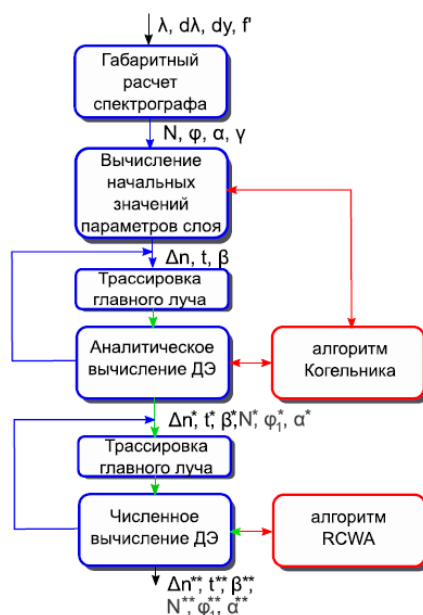


Рис. 5. Алгоритм расчета спектрографа с высокой дисперсией

Разработано несколько вариантов схем спектрографов с высокой дисперсией. В простейшем случае при расчете такой схемы параметры каждой из решеток могут определяться раздельно. В данном случае проще контролировать общую геометрию схемы, однако, как показывает моделирование, не удастся обеспечить равномерность пропускания по рабочему спектральному диапазону. Данный нежелательный эффект обусловлен установкой второй решетки в диспергированном пучке. Угол падения излучения на решетку зависит от длины волны, что усиливает спектральную селективность диспергирующего узла.

Разработана методика расчета такой схемы, использующая трассировку главного луча при циклическом вычислении ДЭ решеток и оптимизации их параметров [16]. Поиск в широкой области параметров выполняется с использованием аналитического метода, определение точных значений с помощью RCWA. Соответствующий алгоритм расчета представлен на рисунке 5. Процедура трассировки главного луча выполняется программным модулем, объединенным с модулем вычисления ДЭ методом RCWA. Соответствующие программные средства реализованы в среде Matlab.

С использованием разработанных методик расчета рассчитаны схемы спектрографов с высокой дисперсией для ближнего инфракрасного (ИК) диапазона 830-870 нм. В частности, разработана схема с отклонением главного луча парой решеток на 180° , отличающаяся конструктивной простотой. Как показывает компьютерное моделирование, спектрограф может обеспечить спектральный предел разрешения 0,016-0,030 нм при числовой апертуре на входе 0,14. При этом максимальная дифракционная эффективность диспергирующего узла может достигать 74,8 %.



Рис. 6. Алгоритм расчета и моделирования спектрографов с голограммными решетками на поверхностях свободной формы

На базе разработанной схемы совместно с АО «ИРЗ» (Ижевск) и НИИ ПРЭФЖС (Казань) создан лабораторный прототип спектрографа с волоконным входом. Экспериментально подтверждена высокая дисперсия, продемонстрировано сравнительно высокое спектральное разрешение, изменяющееся в диапазоне 0,025-0,035 нм.

4. Спектрограф с решеткой на поверхности свободной формы

В контексте типичного противоречия между спектральным разрешением и апертурой спектрографа предложено решение, основанное на использовании голограммной решетки на поверхности свободной формы. Поверхности свободной формы (Freeform) не имеют осевой симметрии и не могут быть описаны с помощью конической постоянной. Сложность их применения при изготовлении голограммных дифракционных решеток заключается в изменении геометрии записи и работы решетки по ее световой зоне. При этом могут значительно изменяться как аберрационные свойства, так и ДЭ решетки. Существующие методики и программные средства не позволяют проводить расчет и моделирование таких решеток.

Разработана методика расчета и моделирования [17] схем с решетками на поверхностях свободной формы (рисунок 6). Для оценки ДЭ используется аналитический метод связанных волн. Схема спектрографа может корректироваться по результатам оценки. Для точного моделирования ДЭ используется метод элементарных решеток и метод RCWA. При этом учитываются данные об углах падения в схемах записи и работы, полученные при трассировке лучей. Трассировка лучей выполняется средствами Zemax с использованием специально разработанных библиотек .dll. Данные о геометрии записи работы решетки и результаты трасси-

ровки выгружаются с помощью подпрограммы-макроста. Далее по полученным данным с помощью специальных программных средств, реализованных в Matlab, рассчитывается ДЭ для множества элементарных решеток и элемента в целом.

С использованием данного принципа построения рассчитан ряд оптических схем спектрографов. Наиболее наглядной демонстрацией достигаемых преимуществ является схема спектрографа с плоским полем на основе голограммной решетки на поверхности свободной формы для диапазона 400–800 нм с эквивалентным относительным отверстием 1:2,2 [18]. С помощью компьютерного моделирования показано, что использование поверхности свободной формы позволяет достичь спектрального предела разрешения 1,09-1,55 нм, повысив данный показатель в 2,2 раза в сравнении со случаем использования решетки на сферической поверхности. Подобная схема может быть также реализована за счет использования вспомогательного зеркала свободной формы при записи решетки.

Заключение

Таким образом, в рамках исследования был предложен и реализован новый подход к проектированию спектрографов с объемно-фазовыми решетками, базирующийся на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн. Предложен ряд принципов проектирования и на их основе разработаны новые схемные решения и соответствующие методики проектирования и моделирования. Достигаемое одновременное повышение спектрального разрешения и энергетических характеристик подтверждается результатами расчетов, моделирования и экспериментов.

Совокупность полученных результатов позволяет говорить о создании новой методологии проектирования и нового класса оптических систем, отличающихся улучшенными функциональными характеристиками.

Список источников

- [1] **Strassmeier, K. G.** PEPsi: The high-resolution echelle spectrograph and polarimeter for the Large Binocular Telescope / K. G. Strassmeier, I. Ilyin, A. Jarvinen, et al. // *Astron. Nachr.* — 2015. — Vol. 336. — № 4. — P. 324–361.
- [2] Multitype ICP Emission Spectrometer ICPE-9000 / URL: <http://www.masontechnology.ie>
- [3] Mechelle 5000 / URL:
- [4] Echelle spectrograph (LIBS): ESA 4000plus / URL: <https://www.lainstruments.com>
- [5] Andor HoloSpec/URL: <https://andor.oxinst.com>
- [6] Дифракционный монохроматор-спектрограф M150 / URL: <http://gmirs.ru/instrument001>.
- [7] CAS 140CT Array Spectrometer / URL: <http://www.instrumentsystems.com>
- [8] Miniature Spectrometers for Narrowband Laser Characterization/URL: <https://oceanoptics.com>
- [9] **Pang, Y.** Compact high-resolution spectrometer using two plane gratings with triple dispersion / Y. Pang, Y. Zhang, H. Yang, et al. // *Opt. Express.* — 2018. — Vol. 26. — P. 6382–6391.
- [10] **Домненко, В. М.** Моделирование формирования оптического изображения. Учебное пособие / В. М. Домненко, М. В. Бурсов, Т. В. Иванова — СПб: НИУ ИТМО, 2011. — 141 с.
- [11] **Kogelnic, H.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings / H. Kogelnic // *Bell Syst. Tech. J.* — 1969. — Vol. 48. — P. 2909–2947.

- [12] **Moharam, M. G.** Coupled wave analysis for thick hologram gratings / M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, T. K. Gaylord // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 1995. — Vol. 12. — № 5— P. 1068–1077.
- [13] **Муслимов, Э. Р.** Голографический спектрограф умеренного спек трального разрешения / Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева, Г. Г. Валявин, С. Н. Фабрика // *Астрофизический бюллетень.* — 2016. — Том 71. — № 3. — С. 386-395.
- [14] **Muslimov, E.** Experimental study of an advanced concept of moderateresolution holographic spectrograph / E. Muslimov, N. Pavlycheva, G. Valyavin, S. Fabrika, F. Musaev, G. Galazutdinov, E. Emelianov // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* — 2018. — Vol. 130. — № 989. — P. 075001.
- [15] **Nureev, I. I.** Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme / I. I. Nureev, O. G. Morozov, S. V. Feofilaktov, D. A. Cherepanov, E. R. Muslimov, N. K. Pavlycheva // *Proc. of SPIE.* — 2016. — Vol. 9807 — P. 98070Y.
- [16] **Muslimov, E.** Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov, A. Kuznetsov, L. Faskhutdinov, A. Sakhabutdinov, N. Pavlycheva // *Optical engineering.* — 2018. — Vol. 57. — № 12.
- [17] **Muslimov, E.** Design and modelling of spectrographs with holographic gratings on freeform surfaces / E. Muslimov, M. Ferrari, E. Hugot, J.-C. Bouret, C. Neiner, S. Lombardo, G. Lemaitre, R. Grange, I. Guskov // *Optical engineering.* — 2018. — Vol. 57. — № 12.
- [18] **Муслимов, Э. Р.** Использование поверхностей свободной формы для создания вогнутых пропускающих голограммных дифракционных решеток / Э. Р. Муслимов // *Вестник Казанского Государственного технического университета им. А. Н. Туполева.* — 2018. — № 3.