

46. Усовершенствованный алгоритм расчета допусков в системах спектрографов с объемно-фазовыми голограммными решетками

М. К. Бакшаев¹, И. А. Гуськов^{1, 2}, Э. Р. Муслимов^{1, 3}, А. Н. Мельников², А. Р. Гильфанов^{1, 2}

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

² АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

³ Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France

В настоящем исследовании рассматривается алгоритм расчета допусков спектрографов со сложным диспергирующим узлом. Разработанный алгоритм и реализующие его программные средства позволяют включить данные о дифракционной эффективности в процесс анализа допусков. Особенности применения данного алгоритма продемонстрированы на примере спектрографа с мозаичным диспергирующим устройством. Он обеспечивает спектральное разрешение 0,78–1,25 нм в области 325–1000 нм при дифракционной эффективности решеток от 74,3 до 99,7 %. Однако включение в анализ требований к дифракционной эффективности подразумевает повышение точности изготовления и сборки как диспергирующего узла, так и линзовой части.

Ключевые слова: Объемно-фазовые голограммы, Спектрограф, Расчет допусков, Дифракционная эффективность.

Цитирование: Бакшаев, М. К. Усовершенствованный алгоритм расчета допусков в системах спектрографов с объемно-фазовыми голограммными решетками / М. К. Бакшаев, И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, А. Н. Мельников, А. Р. Гильфанов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 242–247.

Введение

Объемно-фазовые голограммные решетки (также часто используется аббревиатура VPН — volume-phase hologram) широко известны благодаря своей высокой дифракционной эффективности и относительной простоте изготовления решетки с заданными параметрами. Также они характеризуются высокой угловой и спектральной селективностью [1]. С одной стороны, это позволяет создавать оптические схемы с улучшенными характеристиками и новыми функциональными возможностями, с другой стороны, эти свойства должны быть тщательно учтены при выполнении проектирования и анализа.

При проектировании спектрографов на базе объемно-фазовых голограммных решеток следует учитывать указанные особенности на различных этапах проектирования. Во-первых, параметры решетки и параметры схемы ее работы влияют как на качество изображения, так и на дифракционную эффективность (ДЭ). Поэтому при определении номинальных парамет-

ров необходимо объединять два цикла оптимизации. Во-вторых, любое отклонение от номинальных параметров приведет к снижению как качества изображения, так и эффективности. Соответственно, при определении допусков также необходимо проводить два цикла расчетов.

Ранее нами была рассмотрена процедура проектирования спектрографа со сложным диспергирующим узлом на основе объемно-фазовых голограммных решеток [2]. Экспериментальное исследование оптической системы спектрографа выявило необходимость анализа допусков с одновременным учетом параметров схемы и параметров голографической структуры решетки. Однако такой анализ не может быть выполнен с помощью стандартных программных средств. Таким образом, основная цель настоящего исследования — разработать алгоритм расчета допусков для схем с объемно-фазовыми решетками и создать специализированные программные средства для его реализации.

1. Алгоритм расчета

Разрабатываемый алгоритм расчета допусков должен позволять учитывать изменение дифракционной эффективности объемно-фазовых решеток. Кроме того, как было указано выше, основной областью его применения является проектирование сложных диспергирующих узлов. Эти обстоятельства не позволяют использовать известные методики и стандартные программные инструменты для расчета.

Во-первых, для реализации требуемого алгоритма необходимо учесть параметры голографической структуры решетки при трассировке лучей. Технически этот пункт реализуется путем создания пользовательского типа поверхности в пакете программ для оптических расчетов. В данном случае была создана пользовательская библиотека *.dll для задания толщины голографической структуры, глубины модуляции показателя преломления и наклона полос решетки при моделировании в среде Zemax. В остальных отношениях поверхность идентична классической дифракционной решетке.

Во-вторых, необходимо внести расчеты дифракционной эффективности в процедуру моделирования спектрографа. В рамках данного исследования используются аналитические соотношения теории связанных волн Когельника [3]. Программная реализация вычислений эффективности в Zemax требует создания подпрограммы-макроса. Макрос использует данные трассировки лучей и параметры голографической структуры, заданные с помощью пользовательской поверхности для вычисления дифракционной эффективности.

Вычисленные значения могут быть использованы для расчета оценочной функции. Оценочная функция аналогична функции, используемой в [4]. В данном случае она имеет вид

$$f = \begin{cases} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q w_{jk} \Delta \rho_{jk}, & \eta_i > \eta_{\text{lim } i}, \\ \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q w_{jk} \Delta \rho_{jk} + \sum_{i=1}^s |\eta_i - \eta_{\text{lim } i}|, & \eta_i \leq \eta_{\text{lim } i}, \end{cases} \quad (10)$$

где $\Delta \rho$ — поперечная абберация луча, η — дифракционная эффективность, w — весовой коэффициент, Вычисление проводится для $p \times q$ точек зрачка и s длин волн. При этом ограничение на дифракционную эффективность учитывается только при переходе через заданное критическое значение η_{lim} .

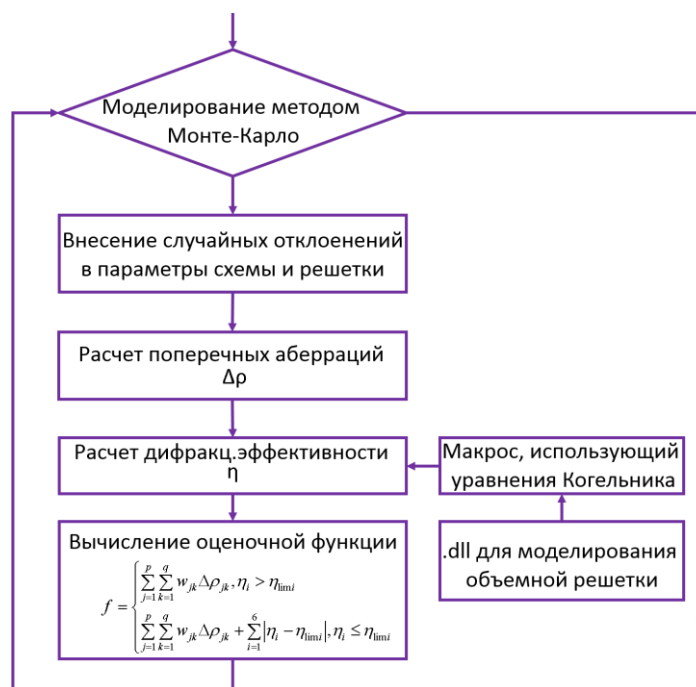


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета допусков

Таблица 1. Основные оптические характеристики спектрографа.

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, нм	375–625 и 600–1000
Фокусное расстояние объективов, мм	100
Относительное отверстие объектива (канала)	1:4 (1:8)
Размер фотоприемника, мм	24 × 2

Алгоритм расчета показан в виде блок-схемы на рисунке 1.

Оценочная функция (1) используется как критерий качества при анализе допусков методом Монте-Карло. В заданных диапазонах генерируются случайные отклонения параметров схемы и структуры решетки. Проводится вычисление aberrаций и дифракционной эффективности и, далее, значения оценочной функции. Допустимым считается повышение значения оценочной функции на 10 %. Из практических соображений достаточно получить вероятность > 80 % выполнения данного требования по результатам моделирования методом Монте-Карло.

2. Пример расчета

В качестве примера рассмотрим спектрограф с мозаичным диспергирующим элементом, состоящим из двух объемно-фазовых решеток. Подробно данная оптическая схема описана в [5]. Такая схема наиболее наглядна в контексте данного исследования, поскольку объединение двух каналов требует повышения точности изготовления и сборки. Основные характеристики оптической схемы спектрографа представлены в Таблице 1.

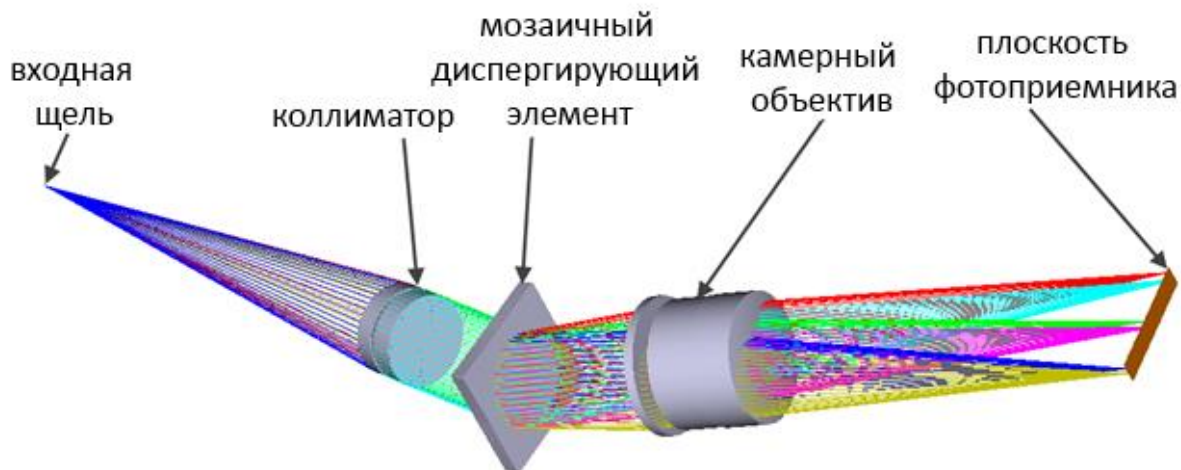


Рис. 2. Общий вид оптической схемы спектрографа с мозаичным диспергирующим элементом.

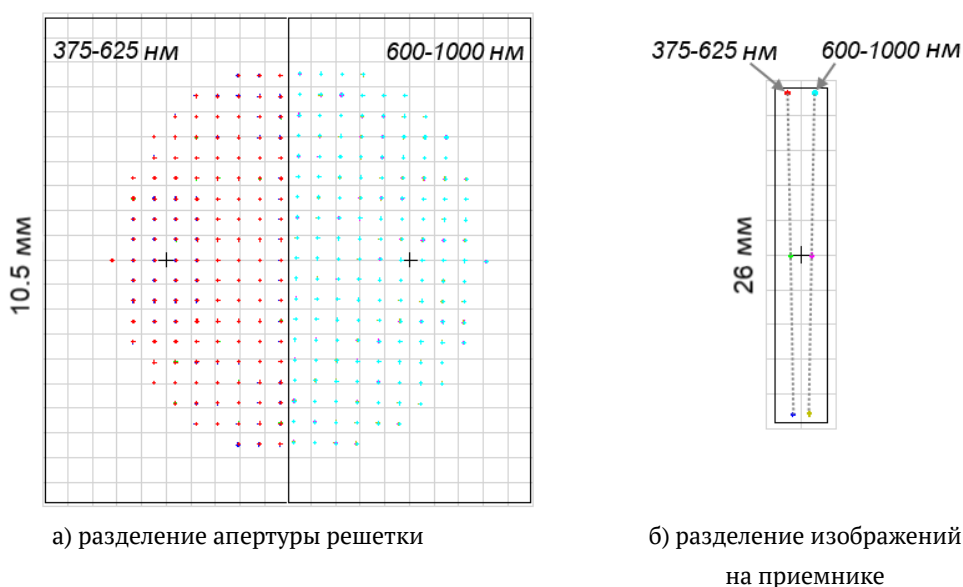


Рис. 3. Пространственное разделение каналов

Оптическая схема, разработанная для этих исходных данных, показана на рисунке 2. Спектрограф состоит из входной щели, коллиматора, мозаичного диспергирующего узла ВРН, камерного объектива и фотоприемника. Входная щель должна иметь относительно небольшую высоту, чтобы избежать наложения двух спектральных изображений. Коллиматор представляет собой несклеенный двухлинзовый объектив, в качестве камерного используется объектив типа Тессар.

Мозаичный диспергирующий узел представляет собой две объемно-фазовые решетки, нанесенные на одну поверхность. Частота штрихов каждой из решеток выбрана таким образом, что для заданных рабочих спектральных диапазонов и общего угла падения углы дифракции совпадают. Это позволяет использовать для двух поддиапазонов те же камеру и кол-

Таблица 2. Допуски на параметры дифракционных решеток

Геометрические параметры	Параметры голографической структуры		
Разворот, угл. мин.	1,2	Частота штрихов, мм ⁻¹	2,2
Форма поверхности, доля длины волны	0,25	Толщина, мкм	1
Показатель преломления × 10 ⁻³	1	Разворот полос, угл. мин.	18
Число Аббе	5	Глубина модуляции	0,001

Таблица 3. Допуски на параметры дифракционных решеток

Параметр	Значение без учета ДЭ	Значение с учетом ДЭ
Толщина, мкм	15	5
Радиус, инт. полос	3	1
Наклон, угл. мин.	0,6	0,6
Центрировка, мкм	5	5
Качество поверхности, доля длины волны	0,125	0,07
Показатель преломления × 10 ⁻³	1	0,5
Число Аббе	2	1

лиматор. Разделение спектральных изображений на фотоприемнике достигается за счет введения небольшого относительного разворота двух решеток. Схема разделения апертуры и спектрального изображения показана на рисунке 3.

Компьютерное моделирование показало, что в данной схеме достигается спектральное разрешение 0,78 нм в области 375–625 нм и 1,25 нм в области 600–1000 нм. При этом дифракционная эффективность двух решеток для неполяризованного излучения изменяется в пределах 73,4–99,0 % и 79,7–99,7 %, соответственно.

Результаты расчета допусков, проведенного по разработанному алгоритму, приведены в Таблице 2.

Расчеты показали, что допуски на расположение решетки и параметры подложки остаются относительно широкими при включении в расчет показателей дифракционной эффективности. При этом допуски на параметры голографической структуры довольно жесткие. Это означает, что при записи решеток следует использовать специальные средства контроля и измерения.

Аналогично, наиболее жесткие допуски для линзовой части схемы представлены в Таблице 3.

Видно, что более жесткими становятся допуски на геометрические параметры линзовой части системы, кроме центрировки и разворота.

Заключение

В настоящем исследовании был разработан и реализован алгоритм расчета допусков для спектрографов со сложными диспергирующими узлами на основе объемно-фазовых голограммных решеток. Алгоритм позволяет одновременно учитывать показатели качества изображения и дифракционной эффективности.

Работа алгоритма продемонстрирована на примере схемы спектрографа с мозаичным диспергирующим узлом. Показано, что включение в анализ требований к дифракционной эффективности подразумевает повышение точности изготовления и сборки как диспергирующего узла, так и линзовой части.

Список источников

- [1] **Caulfield, H. J.** Handbook of optical holography / H. J. Caulfield. — New York: Academic Press, 1979. — P. 587–595.
- [2] **Muslimov, E.** Experimental study of an advanced concept of moderate resolution holographic spectrograph / E. Muslimov, N. Pavlycheva, G. Valyavin et al. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2018. — Vol. 130. — P. 075001.
- [3] **Kogelnik, H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — P. 2909.
- [4] **Muslimov, E. R.** Transmission holographic grating with improved diffraction efficiency for a flat-field spectrograph / E. R. Muslimov // Proc. of SPIE. — 2013. — Vol. 8787. — P. 87870B.
- [5] **Melnikov, A. N.** Modelling and tolerance analysis of volume-phase gratings in complex dispersive units / A. N. Melnikov, M. K. Bakshaev, E. R. Muslimov, I. A. Guskov // Proc. of SPIE. — 2019. — Vol. 11057. — P. 110571O.