56. Анализ допусков в схеме спектрографа с мультиплексированным диспергирующим элементом

Э. Муслимов¹², А. Дзанутта³, А. Бианко³, Г. Валявин⁴, С. Фабрика⁴, Н. Павлычева², И. Гуськов²

- ¹ Университет Экс-Марсель, Национальный центр научных исследований, Национальный центр космических исследований, Астрофизическая лаборатория Марселя, Марсель, Франция
- ² Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева КАИ, Казань, Россия
- ³ Национальный институт астрофизики, Обсерватория Брера, Милан, Италия
- ⁴ Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, Россия

В настоящей статье приведены результаты расчета допусков на конструктивные параметры мультиплексированного диспергирующего узла для астрономического спектрографа. Спектрограф работает в видимой области 444—706 нм со спектральной разрешающей способностью R ≈ 5 000 и за счет использования нового принципа построения диспергирующего элемента имеет повышенное пропускание оптического тракта. Показано что расчет допусков в такой схеме необходимо проводить дважды — с использованием критериев качества изображения и дифракционной эффективности.

Ключевые слова: Объемно-фазовая голограммная решетка, Спектрограф, Мультиплексированный диспергирующий элемент, Дифракционная эффективность.

Цитирование: **Муслимов**, **Э**. Анализ допусков в схеме спектрографа с мультиплексированным диспергирующим элементом / Э. Муслимов, А. Дзанутта, А. Бианко, Г. Валявин, С. Фабрика, Н. Павлычева, И. Гуськов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 233–235.

Введение

Функциональные возможности современных спектральных приборов во многом определяются характеристиками их диспергирующих элементов. Следовательно, существенное повышение ключевых характеристик спектрального прибора возможно при использовании новых типов диспергирующих элементов и новых принципов их построения. Их применение наиболее востребовано в приборах для научных исследованиях, в частности, в астрономических спектрографах.

Новые фотополимерные материалы, используемые для объемной голографии (например, BayfolTM [1]) отличаются простотой в обработке, устойчивостью к внешним воздействиям и возможностью точного контроля глубины модуляции показателя преломления. Их применение делает практически осуществимыми новые типы голограммных оптических элементов и узлов, в частности, мультиплексированных диспергирующих элементов. Такой элемент представляет собой набор расположенных друг за другом объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток, склеенных вместе. Каждая из дифракционных решеток обладает высокой дифракционной эффективностью в узком спектральном диапазоне и формирует изображение спектра в его пределах. За счет разворота решеток относительно горизонтальной оси изображения спектров разделяются. Как правило, мультиплексированный элемент дополняют двумя призмами для реализации схемы нулевого отклонения (полученный элемент также называют гризмой). Концепция расчета и применения подобных элементов подробно изложена в [2].



1 — входная щель; 2 — коллиматор; 3 — диспергирующий элемент; 4 — «красная» дифракционная решетка; 5 — «зеленая» дифракционная решетка; 6 — «синяя» дифракционная решетка; 7 — камерный объектив; 8 — плоскость ПЗС-матрицы. Рис. 1. Оптическая схема спектрографа с мультиплексированным диспергирующим элементом

Ранее подобный подход был предложен в [3], а его преимущества экспериментально продемонстрированы в [4].

Настоящая работ относится к проекту нового спектрографа видимого диапазона для 1-м телескопа Цейсс-1000 в Специальной Астрофизической Обсерватории РАН [5], использующего мультиплексированный диспергирующий элемент. Полное описание проекта представлено в [6]. Основной задачей, представленной ниже части проекта является определение допусков на конструктивные параметры диспергирующего узла. Особенность расчета допусков в данном случае заключается в высокой чувствительности кривой дифракционной эффективности каждой из решеток к изменениям конструктивных параметров. По этой причине расчет допусков проводится дважды — с использованием критерия качества изображения и с использованием критерия дифракционной эффективности.

1. Оптическая схема

Оптическая схема телескопа рассчитана для видимого диапазона 444—706 нм и должна обеспечивать спектральную разрешающую способность $R \approx 5000$ при работе с входной щелью шириной 34 мкм. Оптическая схема состоит из коллиматора, диспергирующего узла и камерного объектива (см. рис. 1).

В качестве коллиматора используется серийный двухлинзовый склеенный объектив с фокусным расстоянием $f'_{\text{кол}} = 200$ мм, работающий с малым полем зрения и с относительным отверстием, определяемой телескопом, т. е. 1:13. В качестве камерного объектива используется серийный фотообъектив ($f'_{\text{кам}} = 200$ мм, номинальное относительное отверстие 1:2). Диспергирующий узел представляет собой склейку, включающую две призмы из кварцевого стекла с углом 37,3° и три объемно-фазовые решетки. Решетки имеют частоту штрихов 980, 1147 и 1349 штр./мм и обеспечивают формирование спектра в диапазонах 605–706, 518–605 и 444–518 нм соответственно. Далее они обозначаются как «красная», «зеленая» и «синяя» решетки.

2. Расчет допусков по критерию качества изображения

При расчете допусков на конструктивные параметры схемы по критерию качества изображения используются стандартные программные инструменты Zemax. Предполагается, что изображение спектра регистрируется с помощью ПЗС матрицы размером 2048 × 2048 пикселей с размером пикселя 15 × 15 мкм. Соответственно, в качестве основного требования к качеству изображения используется среднеквадратический диаметр точечной диаграммы, который не должен превышать ½ размера пикселя. Расчет ведется для 9 контрольных длин волн, соответствующих краям и центрам указанных выше диапазонов.

Кроме того, при расчете принимается, что изготовление и юстировка двух используемых в схеме серийных объективов соответствует стандартному

Табл. 1. Допуски на параметры объективов		
Толщина по оси	50 мкм	
Радиус кривизны	3 инт. полос	

Радиус кривизны	З инт. полос
Ошибка формы поверхности	$1/4 \lambda$
Децентрировка	0,1 мкм
Наклон	1,2'
Показатель преломления	0,0005
Число Аббе	0,3

Табл. 2. Допуски на параметры диспергирующего узла

Толщина по оси	0,2 мкм
Радиус кривизны	0,5 инт. полос.
Ошибка формы поверхности	$1/6 \lambda$
Децентрировка	500 мкм
Наклон	12'
Показатель преломления	0,001
Число Аббе	0,7
Частота штрихов	10 штр./мм



Рис. 2. Результаты анализа влияния параметров схемы на качество изображения методом Монте-Карло

Толщина слоя, мкм	2 мкм
Глубина модуляции	0,001
Наклон полос	8'
Угол падения	10′
Угол конической диракции	15'
Частота штрихов	10 штр./мм
Показатель преломления подложки	0,005

уровню точности [7]. Соответствующие значения допусков представлены в табл. 1.

При расчете используется метод Монте-Карло, позволяющий учесть одновременное влияние всех отклонений. В процессе расчета предполагалось, что допуски на параметры всех решеток одинаковы. Полученные значения приведены в табл. 2.

На рис. 2 показана зависимость вероятности достижения диаметра точечной диаграммы от его значения, полученная в результате анализа методом Монте-Карло.

3. Расчет допусков по критерию дифракционной эффективности

Расчет допусков на параметры голографического слоя проводился по аналогичной методике. Для расчета значений дифракционной эффективности использовался пакет reticolo [8], реализующий метод строгого анализа связных волн (RCWA) в среде Matlab. В качестве критерия использовалось значение дифракционной эффективности в центре рабочего диапазона каждой из решеток, которое должно быть выше 90 %. Расчет проводился с использованием метода Монте-Карло. Результаты расчёта допусков сведены в табл. 3.

Аналогично, на рис. З показана зависимость вероятности достижения заданной эффективности от ее значения.

Из табл. 2 и 3 видно, что часть параметров учитывается в обоих расчетах. При этом требования к углу падения, определяемые из условия максимума эффективности, оказываются жестче, а требования к показателю преломления и частоте штрихов остаются без изменений.

Заключение

Таким образом, в результате расчета допусков было показано, что в схеме спектрографа с мультиплексированным диспергирующим элементом требо-



Рис. 3. Результаты анализа влияния параметров схемы на дифракционную эффективность методом Монте-Карло

вания к одним конструктивным параметрам определяются критерием качества изображения, к другим — критерием дифракционной эффективности. Проведение анализа по обоим критериям крайне важно, особенно для определения требований к точности углового позиционирования дифракционных решеток.

При этом для конкретной схемы спектрографа. Разрабатываемого для САО РАН все найденные допуска являются технологически реализуемыми.

Список источников

- [1] **Bruder, F. K.** The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer / F. K. Bruder, T. Fäcke, T. Rölle // Polymers. 2017. Vol. 9. № 10. P. 472.
- [2] Zanutta, A. Spectral multiplexing using stacked volume-phase holographic gratings I / A. Zanutta, M. Landoni, M. Riva, A. Bianco // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Vol. 469. — № 2. — P. 2412–2422.
- [3] **Muslimov, E. R.** Moderate-resolution holographic spectrograph / E. R. Muslimov, N. K. Pavlycheva, G. G. Valyavin et al. // Astrophys. Bull. 2016. Vol. 71. P. 357.
- [4] Muslimov, E. Experimental study of an advanced concept of moderate-resolution holographic spectrographs / E. Muslimov, G. Valyavin, S. Fabrika, F. Musaev, G. Galazutdinov, N. Pavlycheva and E. Emelianov // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2018. — Vol. 130. — № 989. — P. 075001.
- [5] Drabek, S. V. Study of the quality of the Zeiss-1000 telescope optical system using the Shack Hartmann wavefront sensor / S. V. Drabek, V. V. Komarov, S. A. Potanin et al. // Astrophys. Bull. — 2017. — Vol. 72. — P. 206.
- [6] Zanutta, A. Spectral multiplexed VPHG based on photopolymers: the first application on a spectrograph / A. Zanutta, E. Muslimov, G. Valyavin, S. Fabrika, A. Bianco // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10706. P. 10706125.
- [7] Optimax. Manufacturing Tolerance Chart / URL: <u>https://www.optimaxsi.com/innovation</u>.
- [8] Chateau, N. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction / N. Chateau, J.-P. Hugonin // J. Opt. Soc. Am. A. — 1994. — Vol. 11. — № 4. — P. 1321–1331.

Tolerance analysis in optical scheme of a spectrograph with multiplexed dispersive element

- E. Muslimov¹², A. Zanutta³, A. Bianco³, G. Valyavin⁴, S. Fabrika⁴, N. Pavlycheva², I. Guskov²
- ¹ Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France
- ² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KAI, Kazan, Russia
- ³ INAF Osservatorio Astronomico di Brera, Milan, Italy
- ⁴ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, Russia

In the present paper the results of tolerance analysis for a multiplexed dispersive element for an astronomical spectrograph are considers. The spectrograph operates in the visible domain of 444–706 nm with the spectral resolving power of $R \approx 5000$ and provides enhanced throughput due to use of a novel design principle of the dispersive element. It is shown that in such a scheme the tolerance analysis should be performed twice — for the image quality criterion and for the diffraction efficiency criterion.

Keywords: Volume-phase grating, Spectrograph, Multiplexed dispersive element, Diffraction Efficiency.