Моделирование астрономического спектрографа с голограммной дифракционной решеткой на поверхности свободной формы

- Э. Муслимов¹², Э. Уго¹, С. Ломбардо¹, М. Феррари¹, Ж.-К. Буре¹, 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

В настоящей статье рассматриваются методика моделирования голограммных дифракционных решеток решеток на поверхностях свободной формы и их программная реализация. Продемонстрировано применение такого компонента в качестве решетки скрещенной дисперсии в канале среднего УФ инструмента POLLUX для космического телескопа следующего поколения LUVOIR. Спектральная разрешающая способность превосходит 120 000 для всего диапазона 118,5—195 нм, а дифракционная эффективность решетки может достигать 80 %.

Ключевые слова: Поверхность свободной формы, Голограммная дифракционная решетка, Спектральное разрешение, Дифракционная эффективность.

Цитирование: **Муслимов**, **Э.** Моделирование астрономического спектрографа с голограммной дифракционной решеткой на поверхности свободной формы / Э. Муслимов, Э. Уго, С. Ломбардо, М. Феррари, Ж.-К. Буре, 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. 199–203.

Введение

Использование поверхностей свободной формы (т. е. поверхностей без вращательной симметрии, описываемых без использования конической постоянной) открывает новые возможности в области проектировании оптических систем [1]. С их помощью можно реализовать коррекцию аберраций в системах с увеличенной апертурой и/или полем зрения, уменьшить число используемых оптических компонентов, а также выполнить специфические требования к геометрии схемы, например, отсутствие экранирования [2].

В то же время, существующая технология изготовления голограммных оптических элементов, подразумевающая запись интерференционной картины на фоточувствительном материале, не имеет явных ограничений со стороны формы поверхности подложки и может быть использована для создания голограммного элемента на поверхности свободной формы. Подобный голограммный оптический элемент может обладать большим числом коррекционных параметров и обеспечивать высокое качество изображения при работе в оптических схемах предельно высокими функциональными характеристиками.

Использование подобных элементов было продемонстрировано на примере спектрографа ELOIS [3], построенного по схеме Оффнера с дифракционной решеткой, нанесенной на поверхность свободной формы и имеющей переменный шаг штрихов. Также дифракционные решетки на поверхностях свободной формы использовались в спектрографах, описанных в [4–6].

В настоящей работе мы рассматриваем описание и моделирование наиболее голограммной решетки на поверхности свободной формы для наиболее общего случая, а также применение такой поверхности при проектировании конкретного инструмента. В качестве примера приведен канал среднего ультрафиолетового излучения (УФ) спектрографа-спектрополяриметра POLLUX [7, 8] для космического телескопа следующего поколения LUVOIR [9].

Канал среднего УФ работает в области 118,5— 195 нм и должен обеспечивать спектральную разреша-



 1 — входная диафрагма, 2 — плоскость дихроичного зеркала, 3 — модулятор, 4 — призма Волластона, 5 — зеркальный коллиматор, 6 — эшеле, 7 — голограммная решетка на поверхности свободной формы, 8 — плоскость приемника Рис. 1. Оптическая схема канала среднего УФ спектрографа

ющую способность не менее 120000 в режимах спектрографа и спектрополяриметра. При этом минимальный спектральный интервал, регистрируемый без разрывов должен составлять не менее 6нм, а число оптических элементов в тракте должно быть минимальным. Оптическая схема канала приведена на рис. 1. Она построена на основе эшелле-спектрографа, в котором функции камерного зеркала и устройства скрещенной дисперсии выполняет голограммная решетка на поверхности свободной формы. В данном случае, помимо высоких требований к качеству изображения приходится учитывать, что на голограммную решетку падает диспергированный пучок, т. е. условия коррекции аберраций существенно отличаются для различных спектральных компонент. Это обуславливает необходимость использования сложной формы поверхности и формы штрихов с переменным шагом и кривизной.

Далее рассматривается описание такой дифракционной решетки при моделировании и оптимизации стандартными программными средствами.

1. Описание поверхности свободной формы

Для описания поверхности свободной формы используются стандартные полиномы Цернике [10]. Такой подход упрощает соотнесение коэффициентов уравнения с отдельными аберрациями, улучшает сходимость численной оптимизации, а также значительно облегчает отладку пользовательских инструментов проектирования.

Полиномы Цернике 2–3 порядков показаны на рис. 2 в виде рельефа поверхности, заданного на единичной окружности.

При моделировании и оптимизации оптической схемы стрелка прогиба поверхности решетки в каждой точке определяется как

$$z = \frac{cr^{2}}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^{2}r^{2}}} + \sum_{i=1}^{N} A_{i}Z_{i}(\rho, \varphi), \qquad (1)$$

Где *с* — кривизна поверхности в вершине, *k* — коническая постоянная (в данном случае k = 0), Z_i — полиномы Цернике, A_i — соответствующие коэффициенты, ρ , ϕ — нормализованные полярные координаты. Уравнение (1) преобразуется в прямоугольную



Рис. 2. Полиномы Цернике 2 и 3 порядков, используемые для описания поверхности свободной формы

систему координат для вычисления координат пересечения луча с поверхностью. Далее вычисляется нор-

маль к поверхности в заданной точке $\vec{N} = (x_n, y_n, z_n)$.

$$z_n = -\sqrt{\frac{1}{1 + (dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}},$$
$$x_n = -\frac{dz}{dx}z_n, y_n = -\frac{dz}{dy}z_n.$$

2. Описание голограммной дифракционной решетки

После определения по формулам (1) и (2) координат и направления нормали в точке пересечения луча рассчитывается его дифракция на голограммной решетке. Предполагается, что картина штрихов формируется в результате интерференции волновых фронтов от двух точечных когерентных источников. Схема записи и трассировки лучей показана на рис. 3.

Для трассировки используется следующее уравнение дифракции в векторной форме [11].

$$\vec{N} \times \left(\vec{r}_{i} - \vec{r}_{d}\right) = m \frac{\lambda}{\lambda_{0}} \vec{N} \times \left(\vec{r}_{1} - \vec{r}_{2}\right)$$
(3)

Здесь \vec{r}_1 и \vec{r}_d — направляющие вектора лучей в схеме записи, \vec{r}_1 и \vec{r}_2 — вектора падающего и дифрагированного лучей, m — порядок дифракции (m = +1), λ_0 и λ — длина волны записи и работы, соответственно.



1, 2 — точечные источники записи; 3 — меридиональная плоскость; 4 — вершина поверхности решетки Рис. 3. Схема записи голограммной дифракционной решетки и трассировки лучей через нее

Процедура трассировки луча через голограммную дифракционную решетку на поверхности свободной формы была реализована на языке С и использована при создании пользовательской библиотеки dll для описания поверхности в среде Zemax. После введения такой поверхности и тестирования, расчет и оптимизацию оптической системы с подобным оптическим элементом можно вести использованием стандартных программных инструментов.

3. Оценка спектрального разрешения и дифракционной эффективности

После оптимизации системы были получены следующие параметры голограммной решетки: частота штрихов в вершине — 212,3 л/мм, линейные координаты источников записи (для аргонового лазера) — (100,194 мм; 1913,946 мм) и (-99,558 мм; 1936,898 мм), фокусное расстояние — 1200 мм, световой размер — 215,4 × 98,3 мм². Поверхность свободной формы описывается 6 полиномами Цернике и имеет максимальное отклонение от ближайшей сферы 3,36 мкм.

Для оценки спектрального разрешения были рассчитаны аппаратные функции (АФ) спектрографа для входной диафрагмы шириной 31,2 мкм (в проекции на плоскость приемника). Как показывают результаты, представленные в табл. 1, для всех контрольных длин волн выполняется требование к спектральной разрешающей способности. Таким образом, коррекционные возможности решетки скрещенной дисперсии достаточны для обеспечения необходимого качества изображения.

Наконец, после определения показателей разрешения, необходимо оценить дифракционную эффективность решетки. Поскольку углы падения и дифракции, а также шаг и ориентация штрихов изменяются по поверхности решетки, расчет проводится для элементарных решеток (рис. 4.). Процедура моделирования дифракционной эффективности включает следующие шаги. Через решетку последовательно трассируется несколько монохроматических пучков лучей. Для каждого пучка вычисляются углы падения и дифракции, а также вектора нормали в точке падения для массива лучей. Данные автоматически формируются в файл подпрограммой-макросом для Zemax. Далее данные считываются и обрабатываются в MatLab. Для каждого луча вычисляются значения дифракционной эффективности для двух состояний поляризации, проводится осреднение по пучку, строится спектральная зависимость. Используется решатель GD-Calc [12].

На рис. 5 показаны результаты расчета эффективнсоти для решетки, используемой в описанной выше схеме. Расчеты проведены в предположении, что штрии решетки имеют треугольный профиль с углом блеска 1,92°. Предполагается также, что решетка имеет трехслойное отражающее покрытие Al + LiF + AlF₃.

Как видно из приведенного графика, решетка имеет достаточно высокую эффектинвость по всему рабочему спектральному диапазону и ее значение слабо зависит от состояния поляризации.

Порядок дифракции эшелле	Ооратная линейная дисперсия, нм/мм	Шириа АФ по уровню 0,5, мкм	Спектральная разрешающая способность
31	0,047	31,2	128 909
		31,2	131 008
		31,95	133 106
40	0,036	31,2	132 673
		31,2	131 035
		31,95	126 359
50	0,029	31,95	129 700
		31,2	131 502
		31,2	130 391
	Порядок дифракции эшелле 31 40 50	Порядок дифракции эшелле Оорянал линейная дисперсия, нм/мм 31 0,047 40 0,036 50 0,029	Порядок дифракции эшелле Соранная линейная исперсия, нм/мм АФ по уровню 0,5, мкм 31 0,047 31,2 31 0,047 31,2 40 0,036 31,2 40 0,036 31,2 50 0,029 31,95 50 0,029 31,2 31,2 31,2 31,2 31,95 31,2 31,2 50 0,029 31,95 31,2 31,2 31,2

Табл. 1. Данные о спектральном разрешении.



Рис. 4. Определение исходных данных для моделирования дифракционной эффективности



Рис. 5. Спектральная зависимость дифракционной эффективности канала голограммной решетки на поверхности свободной формы

Заключение

В настоящей статье был продемонстрирован набор программных инструментов для моделирования и оптимизации голограммных дифракционных решеток на поверхностях свободной формы. Также показано их применение при разработке оптической системы одного из каналов УФ-спектрографа POLLUX в составе орбитальной обсерватории LUVOIR. Использование нового типа дифракционных решеток позволяет достичь высокого качества изображения и выполнить требование к спектральной разрешающей способности $R \ge 120\ 000$ при минимальном количестве оптических элементов. При этом дифракционная эффективность элемента достигает 80 %.

В дальнейшем представленный набор методик и инструментов моделирования планируется расширить за счет включения других типов уравнений поверхности, учета конической дифракции при расчете эффективности и др.

Список источников

- Hugot, E. FAME: Freeform Active Mirrors Experiment / E. Hugot, T. Agocs, Z. Challita, A. Jasko, G. Kroes, E. Banyai, C. Miller, W. Taylor, H. Schnetler and L. Venema // Proc. SPIE. — 2014. — Vol. 9151. — P. 915107.
- [2] Fuerschbach, K. A new family of optical systems employing φ-polynomial surfaces / K. Fuerschbach, J. P. Rolland, and K. P. Thompson // Opt. Express. — 2011. — Vol. 19. — P. 21919–21928.
- [3] Liu, C. Comparison of hyperspectral imaging spectrometer designs and the improvement of system performance with freeform surfaces / C. Liu, C. Straif, T. Flügel-Paul, U. D. Zeitner, H. Gross // Appl. Opt. — 2017. — Vol. 56. — P. 6894– 6901.
- [4] Wei, L. Optical design of Offner-Chrisp imaging spectrometer with freeform surfaces / L. Wei, L. Feng, J. Zhou, J. Jing, and Y. Li // Proc. SPIE. 2016. Vol. 10021. P. 100211.
- [5] Reimers, J. Increased Compactness of an Imaging Spectrometer Enabled by Freeform Surfaces / J. Reimers, K. P. Thompson, J. Troutman, J. D. Owen, A. Bauer, J. C. Papa, K. Whiteaker, D. Yates, M. Farsad, P. Marasco, M. Davies, J. P. Rolland // Optical Design and Fabrication. — 2107. — P. JW2C.5.
- [6] Marchi, A. Z. Freeform Grating Spectrometers For Hyperspectral Space Applications: Status of ESA Programs / A. Z. Marchi, B. Borguet // Optical Design and Fabrication. — 2017. — P. JTh2B.5.
- [7] Muslimov, E. Spectrographs with holographic gratings on freeform surfaces: design approach and application for the LUVOIR mission / E. R. Muslimov, M. Ferrari, E. Hugot, J. C. Bouret, C. Neiner, S. Lombardo, G. Lemaitre, R. Grange // Proc. SPIE. — 2018. — Vol. 10690. — P. 1069045.
- [8] Muslimov, E. POLLUX: a UV spectropolarimeter for the LUVOIR space telescope project / E. Muslimov, J. C. Bouret, C. Neiner, A. Lopez Ariste, M. Ferrari, S. Vives, E. Hugot, R. Grange, S. Lombardo , L. Lopes , J. Costerate , F. Brachet // Proc. SPIE. — 2018. — Vol. 10699. — P. 1069905.
- [9] **Bolcar, M.** The Large UV / Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR): Decadal Mission concept design update / M. R. Bolcar, et al // Proc. SPIE. 2017. Vol. 103 P. 1039809.
- [10] Lakshminarayanan, V. Zernike polynomials: a guide / V. Lakshminarayanan, A. Fleck // Journal of Modern Optics. 2011. — Vol. 5. — № 7. — P. 545–561.
- [11] Welford, W. T. A vector raytracing equation for hologram lenses of arbitrary shape / W. T. Welford // Optics communications. 1975. Vol. 14. № 3. P. 322–323.
- [12] Grating Diffraction Calculator / URL: <u>http://kjinnovation.com/GD-Calc.html</u>.

Modelling of astronomical spectrograph with a holographic grating on freeform surface

E. Muslimov¹², E. Hugot¹, S. Lombardo¹, M. Ferrari¹, J.-C. Bouret¹, N. Pavlycheva², I. Guskov²

- ¹ Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, LAM, Marseille, France
- $^{\rm z}$ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev KAI, Kazan, Russia

In the present paper we consider the techniques of modelling of freeform holographic gratings and their implementation in software. Use of such an optical component as a cross-disperser grating in the medium-UV channel of the POLLUX instrument at the next generation LUVOIR space telescope is demonstrated. The spectral resolving power exceeds 120,000 for the entire working range of 118.5–195 nm, while the cross-disperser diffraction efficiency reaches 80 %.

Keywords: Freeform surface, Holographic grating, Spectral resolution, Diffraction efficiency.