

26. Расчёт вогнутых дифракционных решёток со свободной формой поверхности в схемах на круге Роуланда

Ю. В. Бажанов¹, В. Б. Влакко²

¹ АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

² Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии, Москва, Россия

В статье были исследованы возможности применения поверхностей свободной формы для расчета голографических решеток на круге Роуланда. За счет применения таких поверхностей были существенно уменьшены аберрации таких решеток как для широкой спектральной области, перекрывающей весь спектральный порядок, так и для узкой области в применении спектрального анализа предельно высокого разрешения.

Ключевые слова: Свободная форма, Аберрации, Голография, Расчет.

Цитирование: Бажанов, Ю. В. Расчёт вогнутых дифракционных решёток со свободной формой поверхности в схемах на круге Роуланда / Ю. В. Бажанов, В. Б. Влакко // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 161–165.

Введение

Целью настоящей работы является разработка метода расчёта оптимальной поверхности голографической дифракционной решётки для заданной оптической схемы спектрального прибора на круге Роуланда.

1. Методика расчета

В последнее время благодаря главным образом успехам в технологии алмазного точения появляется возможность использования оптических элементов с поверхностями свободной формы (freeform). Математически такую поверхность можно описать в виде степенного ряда

$$x = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} y^i z^j, \quad a_{00} = a_{10} = 0, \quad j - \text{четное},$$

где x — координата в направлении нормали к поверхности, а y и z — координаты в меридиональной и сагиттальной плоскостях, a_{ij} — коэффициенты ряда, которые для различных видов поверхностей приведены в работе [1]. Для всех видов поверхностей коэффициенты

$$r = \frac{1}{2a_{20}}, \quad \bar{r} = \frac{1}{2a_{02}}, \quad (2)$$

где r и \bar{r} — меридиональный и сагиттальный радиусы кривизны в вершине поверхности.

Аберрации вогнутой решётки могут быть выражены в виде разложения в степенной ряд функции оптического пути [1, 2].

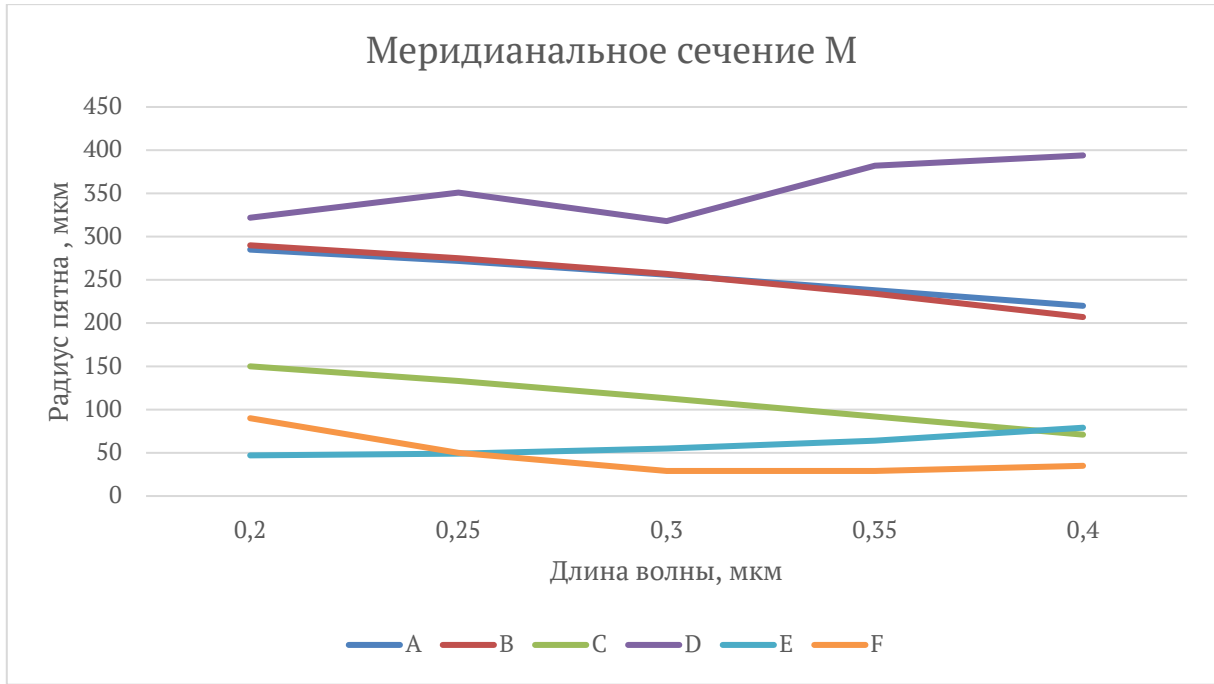


Рис. 1. Среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния в меридиональной плоскости

$$V(y, z, L'_0) = \frac{1}{2} (y^2 V_{200} + z^2 V_{020} + y^3 V_{300} + yz^2 V_{120} + yL_0^2 V_{102}) + \dots + yzL_0' V_{111} + \frac{1}{8} y^4 V_{400} + \frac{1}{4} y^2 z^2 V_{220} + \frac{1}{8} z^4 V_{040} + \dots \quad (3)$$

Коэффициенты V_{ijk} в разложении (3) определяются как

$$V_{ijk} = M_{ijk} - \frac{k\lambda}{\lambda^*} H_{ijk}, \quad (4)$$

где M_{ijk} — коэффициенты разложения, зависящие от положения решётки в оптической схеме. Коэффициенты аберраций 1 и 2-го порядков имеют вид:

$$\begin{aligned} M_{200} &= T + T', \\ M_{020} &= S + S', \\ M_{300} &= -\frac{T}{d} \sin \phi - \frac{T'}{d'} \sin \phi' - 2a_{30} (\cos \phi + \cos \phi'), \\ M_{120} &= -\frac{S}{d} \sin \phi - \frac{S'}{d'} \sin \phi' - 2a_{12} (\cos \phi + \cos \phi'), \\ T &= \frac{\cos^2 \phi}{d} - 2a_{20} \cos \phi, \quad T' = \frac{\cos^2 \phi'}{d'} - 2a_{20} \cos \phi', \\ S &= \frac{1}{d} - 2a_{02} \cos \phi, \quad S' = \frac{1}{d'} - 2a_{02} \cos \phi', \end{aligned} \quad (5)$$

где d и d' — расстояния до источника излучения и его изображения, ϕ и ϕ' — углы падения и дифракции, а k , λ и e_0 — соответственно порядок спектра, длина волны и период штриха в вершине решётки. Коэффициенты H_{ijk} представляют собой условия записи голографической

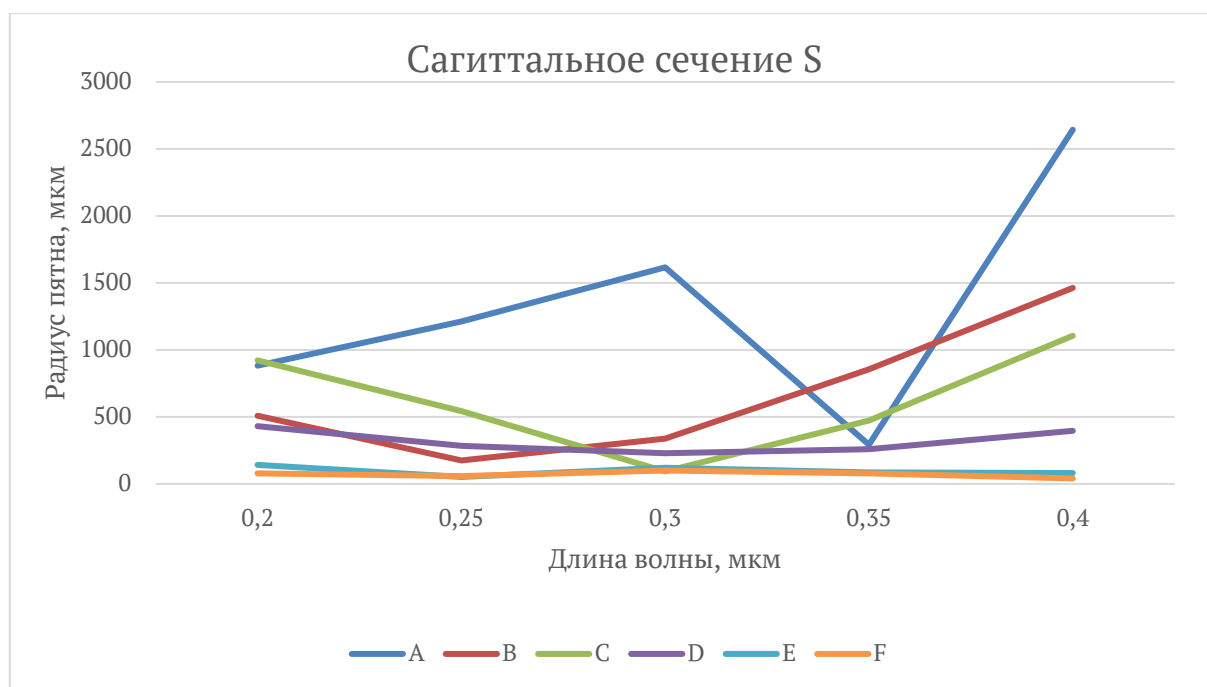


Рис. 2. Среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния в сагиттальной плоскости

решётки и с точностью до знаков выражаются аналогичными уравнениями, где вместо расстояний и углов от предмета и изображения представлены величины, характеризующие положение источников записи: d_1, d_2, i_1 и i_2 .

Известно, что при помещении входной щели спектрального прибора на окружности диаметром равным радиусу дифракционной решётки спектральное изображение, образованное лучами, проходящими в меридиональной плоскости, будет располагаться на этой же окружности (круге Роуланда). Расстояния до щели и изображения найдутся в виде:

$$d = r \cos \phi, \quad d' = r \cos \phi', \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что при условии (6) $M_{200} = M_{500} = 0$, если коэффициенты поверхности $a_{20} = a_{50} = 0$. Таким образом, если коэффициенты $H_{ijk} = 0$, то на круге Роуланда не только дефокусировка, но и кома, образованная лучами, проходящими в меридиональной плоскости равны нулю для всех углов дифракции. Коэффициент a_{02} или \bar{r} найдётся из условия $M_{020} = 0$ остальные коэффициенты a_{ij} определяются из условий равенства нулю оставшихся коэффициентов M_{ijk} . Затем следует численная по программе Zemax оптимизация, где в качестве начальных значений используются найденные значения коэффициентов a_{ij} .

Условие $H_{ijk} = 0$, выполняется если источники записи находятся на бесконечном расстоянии, По принятой классификации это голографическая решётка типа 1, что означает, что решётка имеет равноотстоящие прямолинейные штрихи (классическая решётка). По той же классификации голографической решёткой типа 2, называется решётка, записанная с помощью источников, также расположенных на круге Роуланда. При этом, также как и для решётки типа 1 меридиональная кома равна нулю при всех значениях углов дифракции, а дополни-

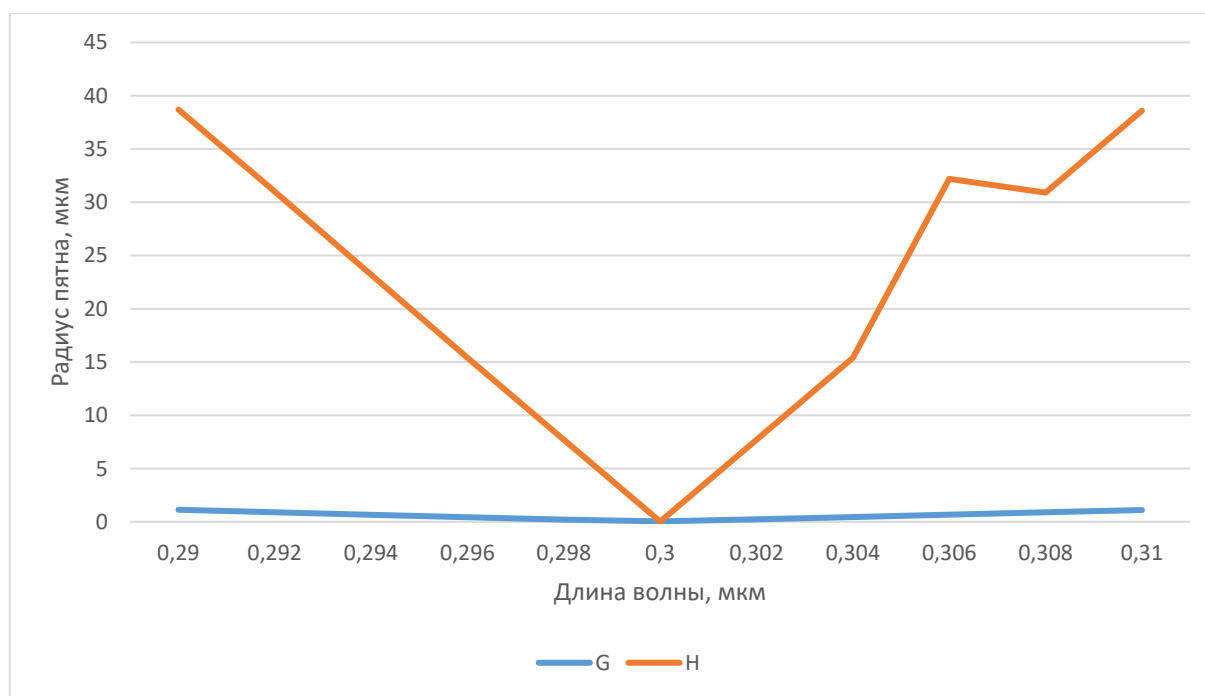


Рис 3. Среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния голографических решёток со свободной формой поверхности

тельный параметр используется для компенсации астигматизма 1-го порядка. Однако возможен более общий вариант голографических решёток типа 2, а именно на расстояния до источников записи накладываются условия, удовлетворяющие фокусировке в меридиональном и сагиттальном сечениях, а дополнительный параметр используется для оптимизации функции, учитывающей суммарное влияние меридиональной и сагиттальной комы. В работе [3] предложена методика расчёта и показано преимущество такого подхода. В настоящей работе рассмотрены оба этих подхода; и решётки, у которых параметры записи находились вне круга Роуланда, дали лучшие результаты. В качестве начальных значений для оптимизации по программе Zemax используются параметры записи и коэффициенты поверхности α_{ij} .

2. Пример расчета на широкую область спектра

В качестве примера рассмотрим схему: $r = 100$ мм, $\phi = 0^\circ$, $d = 100$ мм, $k = 1$, $e_0 = 1/1200$ штр./мм. Рабочая область спектра 0,2–0,4 мкм.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчётов голографических решёток типа 1 и типа 2 с использованием поверхностей свободной формы. В расчёте использовались первые 14 коэффициентов поверхности ряда (1).

Расчитаны следующие варианты голографических решёток:

- А — Тип 1 сферическая.
- В — Тип 1 тороидальная.
- С — Тип 1 свободная форма.
- Д — Тип 2 тороидальная.
- Е — Тип 2 свободная форма.

F — Тип 2 свободная форма с численной оптимизацией параметров записи.

Расчёты показывают, что характеристики решёток обоих типов с усложнением поверхности улучшаются. Важным результатом является то, что высокое качество изображения распространяется на весь порядок спектра. Аналогичные результаты можно получить в видимой (0,4–0,8 мкм) и в ближней ультрафиолетовой (0,8–1,6 мкм) областях спектра, если использовать соответственно решётки 600 и 300 штрихов на миллиметр, параметры записи при этом изменятся.

3. Пример расчета на узкую область спектра

Другим примером использования голографических решёток со свободной формой поверхности является спектральный анализ УФ излучения Солнца или плазмы любой природы, где требуется получить высокое разрешение в узкой спектральной области. На рисунке 3 представлены результаты расчётов голографических решёток типа 2 (G) и типа 1 (H) с оптимизацией на узкую спектральную область в окрестности 300 нм.

Как видим из рисунка голографические решётки типа 2 имеют значительное преимущество, качество спектрального изображения таких решёток близко к дифракционному (радиус кружка Эйри 1 мкм). Используя решётку с частотой штрихов 2400 и 3600 штрихов на миллиметр, можно соответственно получить квазистигматическую область в окрестности 150 и 100 нм.

Список источников

- [1] **Бажанов, Ю. В.** Геометрические параметры штрихов нарезных и голограммных дифракционных решеток / Ю. В. Бажанов // Оптический журнал. — 2003. — Том 70. — №5. — С. 31–34.
- [2] **Noda, H.** Geometric theory of the grating / H. Noda, T. Namioka, M. Seya // Journal of the Optical Society of America A. — 1974. — Vol. 64. — №8. — P. 1031–1036.
- [3] **Бажанов, Ю. В.** Определение оптимальных параметров вогнутых дифракционных решеток в установках на круге Роуланда / Ю. В. Бажанов // Оптика и спектроскопия. — 1983. — Том 55. — Вып. 6. — С. 1053–1058.