

РАСЧЕТ ДИФРАКЦИОННОГО КОРРЕКТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ

Д.И. Краснов

dmitriy_krasnov@outlook.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен обзор автоколлимационной измерительной ветви интерферометра для контроля поверхностей свободной формы с использованием дифракционного оптического элемента в качестве корректора волнового фронта. Разработаны и адаптированы алгоритм расчета фазового профиля дифракционного оптического элемента и алгоритм определения координат его зон, необходимых для изготовления. В качестве примера проведен расчет дифракционного элемента для контроля зеркала свободной формы, деформация которого описана с помощью суммы полиномов Цернике. Предложенный метод контроля позволяет проводить аттестацию любых вогнутых поверхностей, а при использовании вспомогательных элементов — любых выпуклых поверхностей. Для правильной установки корректора в рабочее положение предусмотрены вспомогательные дифракционные элементы на периферии подложки.

Ключевые слова

Интерференционный контроль, автоколлимационная ветвь, дифракционный элемент, корректор волнового фронта, фазовый профиль, поверхность свободной формы, интерферометр, численные методы

Поступила в редакцию 15.07.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. В настоящее время при разработке оптических приборов идут по пути значительного усложнения отдельных оптических элементов для уменьшения их количества в системе при одновременном сохранении качества изображения. Это проявляется в создании дифракционных оптических элементов, голографических оптических элементов и поверхностей свободной формы.

Поверхности свободной формы применяют в телескопах для равномерной коррекции аберраций для всего поля зрения [1–3], в очках дополненной реальности для уменьшения габаритов системы и коррекции хроматических аберраций от широкой спектральной полосы светодиода [4, 5]. Эти поверхности обладают лучшей по сравнению с традиционными поверхностями второго порядка степенью аберрационной коррекции, но для них требуются особые технологии изготовления и контроля. Контроль поверхностей свободной формы удобно проводить компенсационным методом с помощью коррекции аберрации нормалей. Для этого традиционно применяют линзовые и зеркальные корректоры

волнового фронта. Такие корректоры легко изготовить, но они обладают существенным недостатком, который заключается в сложности установки компонентов такого корректора друг относительно друга и других элементов системы. Любая погрешность установки может привести к неправильному контролю изделия и к последующим затратам.

Для предотвращения подобной ситуации для контроля поверхностей свободной формы в качестве корректора волнового фронта часто используют дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [6–8]. Дифракционный оптический элемент позволяет генерировать волновой фронт произвольной конфигурации с помощью специально изготовленного микрорельефа на его поверхности. Использование одного оптического элемента вместо системы линз позволяет избежать больших погрешностей установки компонентов и упрощает юстировку всей системы. Принципиальная схема контроля поверхности свободной формы с помощью дифракционного корректора представлена на рис. 1.

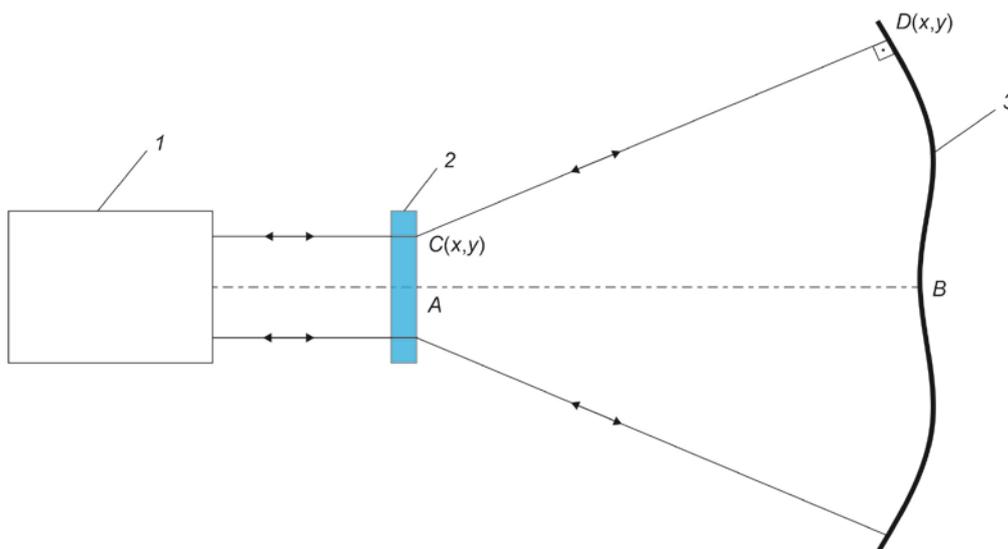


Рис. 1. Принципиальная схема контроля

Представленная схема представляет собой автоколлимационную измерительную ветвь лазерного интерферометра 1, состоящую из корректора 2 и контролируемой поверхности 3. Параллельный пучок, выходящий из интерферометра, преобразуется дифракционным элементом в расходящийся (сходящийся) пучок, лучи которого направлены по нормальям к контролируемой поверхности. Отраженные от контролируемой поверхности лучи по тем же направлениям возвращаются в интерферометр. Отраженный пучок несет информацию о погрешностях изготовления поверхности. Эту информацию извлекают в процессе обработки интерферограммы.

Описание алгоритма расчета дифракционного элемента. Расчет дифракционного оптического элемента заключается в определении его фазового профиля, т. е. функции, показывающей набег фазы, вносимый дифракционным элементом в определенной точке. В дальнейшем по фазовому профилю можно определить геометрические параметры микрорельефа, необходимые для его изготовления. Расчет дифракционного элемента предлагается выполнять с помощью обратной трассировки лучей от контролируемой поверхности (см. рис. 1). Для этого на поверхности выделяют сетку точек $D(x, y)$, в каждой из которых вычисляют направляющие косинусы нормалей к поверхности с помощью частных производных. После этого выполняют трассировку нормалей до плоскости дифракционного элемента для определения координат точек $C(x, y)$ с помощью выражений

$$x_C = x_D + (d - z_D) \frac{N_x}{N_z};$$

$$y_C = y_D + (d - z_D) \frac{N_y}{N_z},$$

где x_C, y_C — координаты точек C ; x_D, y_D, z_D — координаты точек D ; d — расстояние от контролируемой поверхности до дифракционного элемента; N_x, N_y, N_z — направляющие косинусы нормали к контролируемой поверхности в точке D .

С помощью найденных точек можно определить фазовый профиль дифракционного элемента по выражению

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 + d^2} - d \right), \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения лазера.

В выражении (1) с помощью квадратного корня вычисляют длину луча CD , из которой вычитают длину осевого луча. Таким образом, в скобках вычисляется разность хода. Для того чтобы после дифракционного элемента формировался параллельный пучок, все лучи должны выйти из него в одной фазе. Поэтому фазовый профиль дифракционного элемента в определенной точке — это разность фаз между лучом в этой точке и осевым лучом.

Для определения параметров микрорельефа необходимо решить следующее уравнение относительно координат:

$$|\Phi(x, y)| = 2\pi k, \quad (2)$$

где k — порядковый номер зоны микрорельефа.

Решением уравнения (2) являются точки, в которых фазовый профиль равен 2π . Внутри каждой зоны микрорельефа представляет собой киноформную по-

верхность, которая может быть аппроксимирована ступенчатым профилем, получаемым с помощью прямой лазерной записи на фоторезисте или металлорезисте с последующим травлением [9, 10]. Решение уравнения (2) — задача нахождения линий уровня трехмерной поверхности, которая сопровождается большим количеством вычислений. Для упрощения этой задачи фазовый профиль необходимо аппроксимировать аналитическим выражением, например взвешенной суммой степенных полиномов:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M P_{ij} x^i y^j, \quad (3)$$

где P_{ij} — весовые коэффициенты аппроксимации; M, N — максимальные степени полиномов.

Аналитическое выражение позволяет решить описанную выше задачу с помощью сечений поверхности параллельными плоскостями. Пересечением поверхности и секущей плоскости является линия, у которой необходимо найти две точки уровня. После этого секущая плоскость перемещается. Таким образом, двумерную задачу можно свести к одномерной, что значительно упрощает вычисления.

Для демонстрации предложенного алгоритма выполнено вычисление фазового профиля и координат зон микрорельефа дифракционного оптического элемента для контроля вогнутого зеркала свободной формы, которое применяется в трехзеркальном телескопе-анастигмате. Поверхности свободной формы часто описывают с помощью суммы двух поверхностей: базовой поверхности и поверхности деформации. Базовая поверхность представляет собой в общем случае осесимметричную асферическую поверхность произвольного порядка. Поверхность деформации является несимметричной и описывается в виде некоторой суммы полиномов (степенных или Цернике). В данном случае деформация описывается суммой полиномов Цернике:

$$z_{\text{деф}}(r, \varphi) = \sum_{i=1}^N A_i Z_i \left(\frac{r}{R_n}, \varphi \right), \quad (4)$$

где $z_{\text{деф}}(r, \varphi)$ — стрелка прогиба поверхности деформации; A_i — весовые коэффициенты; $Z_i \left(\frac{r}{R_n}, \varphi \right)$ — полиномы Цернике; R_n — нормировочный радиус; N — количество используемых полиномов.

График стрелки прогиба поверхности деформации, рассчитанный по выражению (4), представлен на рис. 2. Фазовый профиль, полученный по выражению (1), показан на рис. 3. Погрешность аппроксимации фазового профиля, определенная с помощью выражения (3), приведена на рис. 4. Все вычисления выполнены в программе MATLAB.

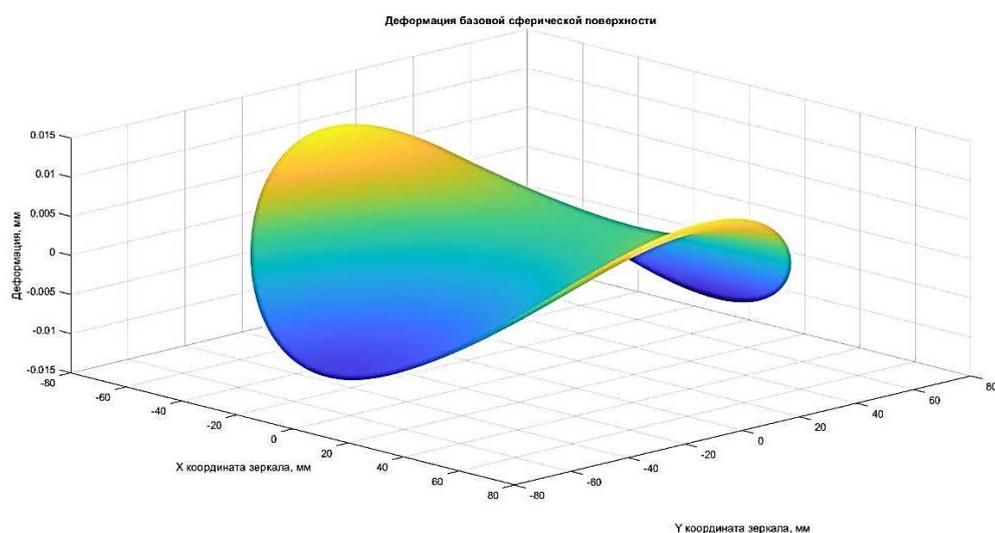


Рис. 2. Деформация зеркала

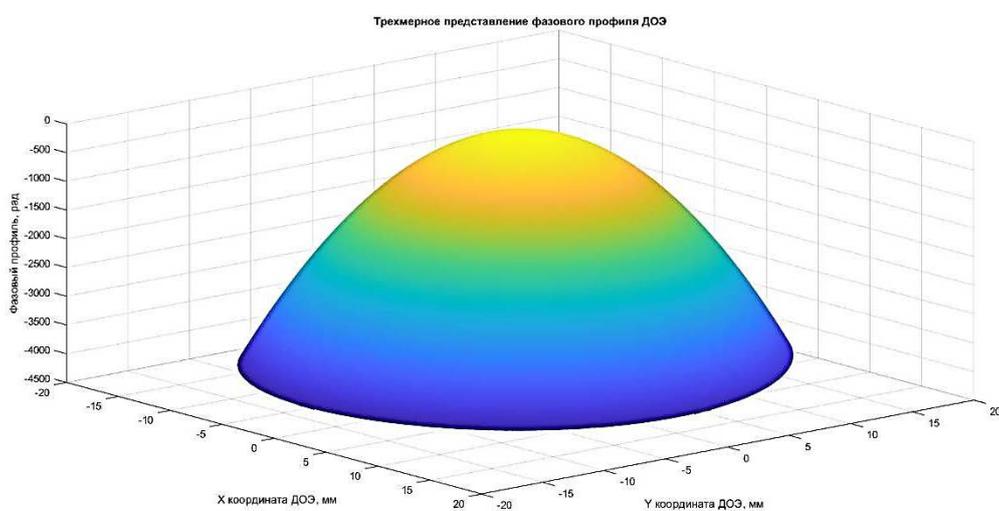


Рис. 3. Фазовый профиль дифракционного элемента

С помощью аналитического выражения можно вычислить координаты зон микрорельефа дифракционного элемента с помощью решения уравнения (2) по описанной выше методике. Результаты решения этой задачи представлены на рис. 5 для нескольких зон. Минимальный период рассчитанного ДОЭ составляет около 11 мкм при диаметре около 40 мм. Диаметр вогнутого зеркала равен 136 мм.

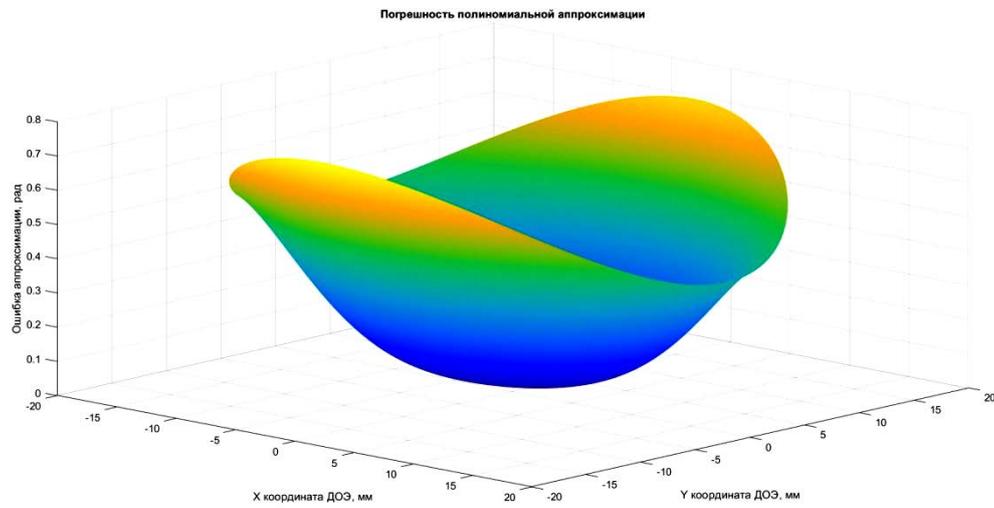


Рис. 4. Погрешность полиномиальной аппроксимации фазового профиля

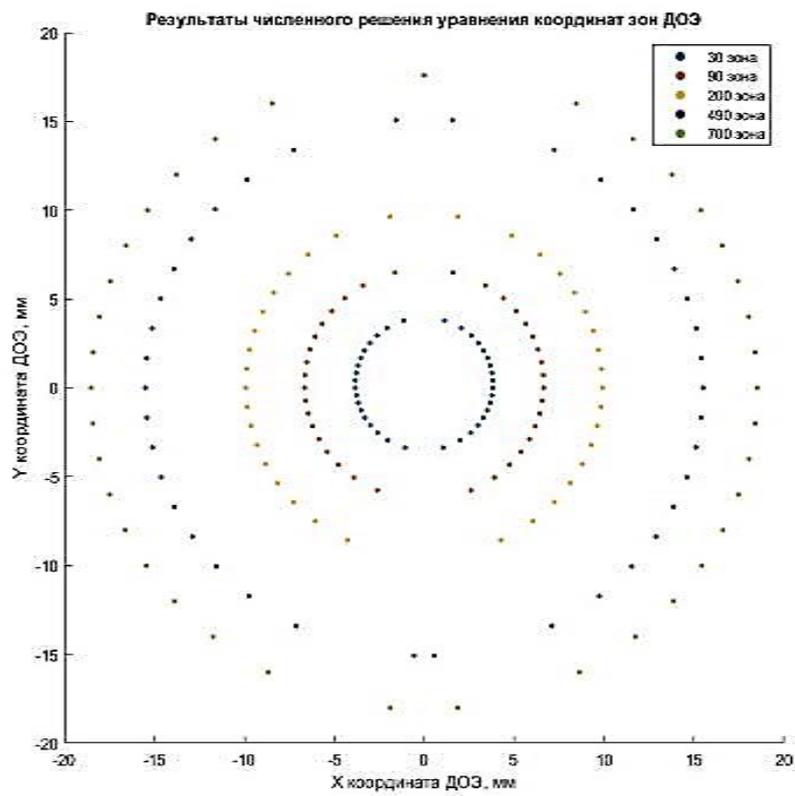


Рис. 5. Координаты зон микрорельефа

Для правильной установки ДОЭ в рабочее положение предлагается использовать вспомогательные дифракционные элементы, находящиеся на краю апертуры вне рабочей зоны (рис. 6).

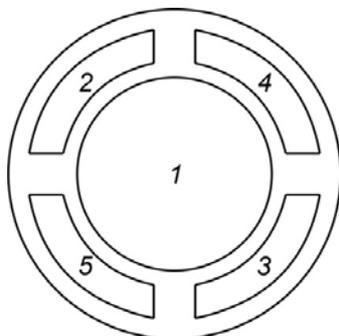


Рис. 6. Комбинированный ДОЭ

Зона 1 является рабочей зоной, а зоны 2–5 используются для контроля положения ДОЭ относительно контролируемой поверхности. Дифракционные элементы 2–5 рассчитаны таким образом, чтобы преобразовывать падающий параллельный пучок в сходящийся пучок, сфокусированный в вершину контролируемой поверхности. Это позволяет создать автоколлимационный ход лучей и контролировать положение дифракционного корректора по интерферограмме.

Заключение. Представленный в данной работе алгоритм расчета легко автоматизируется с использованием любого языка инженерных расчетов, например MATLAB. Алгоритм подходит для расчета дифракционных элементов для контроля любых вогнутых поверхностей и выпуклых поверхностей небольшого диаметра (обычно 200...300 мм). Для крупногабаритных выпуклых поверхностей необходимо применять вспомогательные элементы, например, линзы или зеркала, что необходимо учесть при расчете фазового профиля дифракционного корректора.

Литература

- [1] Challita Z., Agócs T., Hugot E. et al. Design and development of a freeform active mirror for an astronomy application. *Opt. Eng.*, 2014, vol. 53, no. 3, art. 031311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.3.031311>
- [2] Xie Y., Mao X., Li J. et al. Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope. *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59, no. 3, pp. 833–840. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.379324>
- [3] Muslimov E., Hugot E., Jahn W. et al. Combining freeform optics and curved detectors for wide field imaging: a polynomial approach over squared aperture. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 13, pp. 14598–14610. DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.25.014598>

-
- [4] Hu X., Hua H. High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 11, pp. 13896–13903.
DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.22.013896>
- [5] Benítez P., Miñano J.C., Grabovickic D. et al. Freeform optics for virtual reality applications. *Optical Design and Fabrication*, 2017, paper ITu2A.1.
DOI: <https://doi.org/10.1364/IODC.2017.ITu2A.1>
- [6] Zhang H., Wang X., Xue D. et al. Modified surface testing method for large convex aspheric surfaces based on diffraction optics. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 34, pp. 9398–9405.
DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.56.009398>
- [7] Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочиллов А.Ф. Контроль зеркала контррефлектора телескопа "Миллиметр" на основе использования синтезированной голограммы. *Фотоника*, 2016, № 5, с. 44–48.
DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.59.5.44.48>
- [8] Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочиллов А.Ф. Лазерный интерферометр с асферо-голограммным пробным стеклом для термобарокамеры. *Оптический журнал*, 2017, т. 84, № 3, с. 65–66.
- [9] Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалев М.С. Расчет, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [10] Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалев М.С. и др. Особенности плазмохимического травления кварцевого стекла при формировании глубокого рельефа на прецизионных деталях приборов. *Оптический журнал*, 2019, т. 86, № 5, с. 70–77.
DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-05-70-77>

Краснов Дмитрий Игоревич — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Дружин Владислав Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Краснов Д.И. Расчет дифракционного корректора для контроля поверхностей свободной формы. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 08(73).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-08-819>

CALCULATION OF A DIFFRACTION CORRECTOR TO CONTROL FREE-FORM SURFACES

D.I. Krasnov

dmitriy_krasnov@outlook.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

A review of the autocollimation measuring branch of the interferometer to control free-form surfaces using a diffracted optical element as a wavefront corrector is presented. An algorithm for calculating the phase profile of a diffractive optical element and an algorithm for determining the coordinates of its zones required for fabrication are developed and adapted. As an example, the calculation of a diffractive element to control a free-form mirror, the deformation of which is described by the sum of Zernike polynomials, is carried out. The proposed method of control allows the certification of any concave surfaces, and with the use of auxiliary elements - any convex surfaces. For correct installation of the corrector in the working position, the auxiliary diffraction elements on the substrate periphery are provided.

Keywords

Interference control, autocollimation branch, diffraction element, wavefront corrector, phase profile, free-form surface, interferometer, numerical methods

Received 15.07.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Challita Z., Agócs T., Hugot E. et al. Design and development of a freeform active mirror for an astronomy application. *Opt. Eng.*, 2014, vol. 53, no. 3, art. 031311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.3.031311>
- [2] Xie Y., Mao X., Li J. et al. Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope. *Appl. Opt.*, 2020, vol. 59, no. 3, pp. 833–840. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.379324>
- [3] Muslimov E., Hugot E., Jahn W. et al. Combining freeform optics and curved detectors for wide field imaging: a polynomial approach over squared aperture. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 13, pp. 14598–14610. DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.25.014598>
- [4] Hu X., Hua H. High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 11, pp. 13896–13903. DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.22.013896>
- [5] Benítez P., Miñano J.C., Grabovickic D. et al. Freeform optics for virtual reality applications. *Optical Design and Fabrication*, 2017, paper ITu2A.1. DOI: <https://doi.org/10.1364/IODC.2017.ITu2A.1>
- [6] Zhang H., Wang X., Xue D. et al. Modified surface testing method for large convex aspheric surfaces based on diffraction optics. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, no. 34, pp. 9398–9405. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.56.009398>

-
- [7] Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Measurement of convergent mirror of millimeter telescope using computer-generated hologram. *Fotonika* [Photonics Russia], 2016, no. 5, pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.59.5.44.48> (in Russ.).
- [8] Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Laser interferometer with aspherical holographic test glass for thermal vacuum chamber. *Opticheskiy zhurnal*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 65–66 (in Russ.). (Eng. version: *J. Opt. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 212–213. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000212>)
- [9] Odinokov S.B., Sagatelyan G.R., Kovalev M.S. Raschet, konstruirovaniye i izgotovleniye difraktsionnykh i gologrammnykh opticheskikh elementov [Calculation, design and production of diffraction and hologram optical elements]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014 (in Russ.).
- [10] Odinokov S.B., Sagatelyan G.R., Kovalev M.S. et al. Features of the plasma-chemical etching of quartz glass during the formation of deep surface relief on high-precision components of devices. *Opticheskiy zhurnal*, 2019, vol. 86, no. 5, pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-05-70-77> (in Russ.). (Eng. version: *J. Opt. Technol.*, 2019, vol. 86, no. 5, pp. 317–322. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000317>)

Krasnov D.I. — Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Druzhin V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Krasnov D.I. Calculation of a diffraction corrector to control free-form surfaces. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 08(73). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-08-819.html> (in Russ.).