

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ МУЛЬТИФОКАЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗЫ

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Серый Е.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
e-mail: ievgenii.siryi@gmail.com

Предложен метод оценки качества изображений, создаваемых трифокальной дифракционной линзой при наличии фоновой освещенности. Приведена модель фоновой составляющей с неравномерным распределением интенсивности. Продемонстрировано влияние сферической аберрации дифракционной линзы и световой эффективности в рабочем порядке на снижение контраста изображения.

Ключевые слова: мультифокальная дифракционная линза, модуляционная передаточная функция, сферическая аберрация.

Введение

В настоящее время уровень развития методов производства дифракционных оптических элементов позволяет создавать дифракционные линзы (ДЛ) низкой себестоимости с небольшими габаритами и массой, что в свою очередь способствует их широкому использованию при проектировании различного рода оптических систем [1–3].

Современные ДЛ могут быть как моно-, так и мультифокальными. Как правило, монофокальные ДЛ используются в качестве корректоров хроматических аберраций и термической расфокусировки изображающих оптических систем, поэтому имеют незначительную оптическую силу [2–3]. В свою очередь мультифокальные ДЛ нашли широкое применение в офтальмологии как компоненты интраокулярных линз (ИОЛ) [4]. Дифракционная часть ИОЛ обеспечивает резкое видение объектов, расположенных на нескольких фиксированных расстояниях. В то же время такое совмещение изображений приводит к значительному снижению их контраста [5–6]. Кроме мультифокальности, для дифракционной линзы, как и рефракционной линзы, характерно наличие сферической аберрации, что также влияет на качество создаваемых ею изображений [7].

Таким образом, при проектировании ДЛ как компонентов ИОЛ является актуальным проводить оценку влияния фоновых засветок и

сферической аберрации на качество изображений, что количественно осуществляется через вычисление модуляционной передаточной функции (МПФ). Расчет МПФ для мультифокального элемента на основе традиционных волновых преобразований является достаточно сложной процедурой. Поэтому цель работы заключалась в разработке более простого метода вычисления МПФ, который позволит достаточно быстро и точно определить качество изображений, создаваемых мультифокальной ДЛ.

Основная часть

Рассмотрим ДЛ с косинусным профилем, которая имеет три фокуса, смещенные относительно центрального $f_0 = 22,6$ мм на ± 2 дптр [8]. Диаметр линзы $D = 7$ мм, дифракционная эффективность для света с длиной волны $\lambda = 0,555$ мкм в каждом фокусе составляет 30 %. В результате совмещения такой ДЛ и рефракционной поверхности с оптической силой 2 дптр получим дифракционную ИОЛ с диапазоном фокусирования 4 дптр. Такая ИОЛ обеспечивает резкое видение объектов, расположенных на трех фиксированных расстояниях: бесконечность, 50 см и 25 см [8].

При освещении представленной ДЛ параллельным пучком света она построит три пространственно разделенных изображения (рисунок 1). Согласно геометрии построения изобра-

жений интенсивность света в каждой фокальной плоскости F_1, F_0, F_2 имеет две составляющие: интенсивность главного $I_i(r_0)$ и фонового $I_{BG}(r_0)$ изображений (рисунок 2).

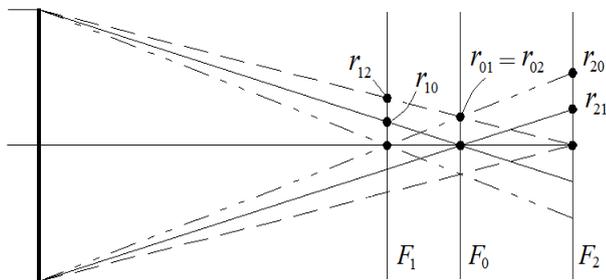


Рисунок 1 – Формирование изображения трифокальной дифракционной линзой: F_1, F_0, F_2 – фокальные плоскости; r_{ij} – радиальный размер фонового изображения в i -ой фокальной плоскости, которое создает j -ая фокальная плоскость

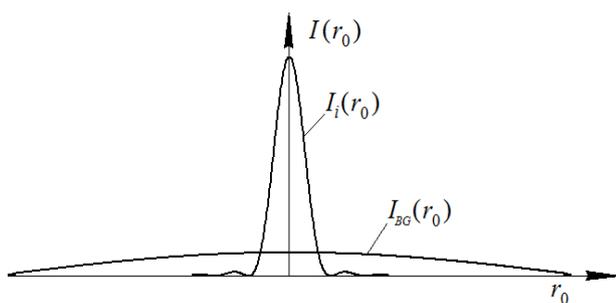


Рисунок 2 – Распределение интенсивности света в i -ой фокальной плоскости дифракционной линзы: $I_i(r_0)$ – интенсивность главного изображения; $I_{BG}(r_0)$ – интенсивность фонового изображения

Как известно, МПФ в полярной системе координат рассчитывается как модуль нормированного преобразования Фурье–Бесселя от функции распределения интенсивности в изображении бесконечно удаленного объекта $I(r_0)$, которая в случае ДЛ в общем виде имеет вид $I(r_0) = I_i(r_0) + I_{BG}(r_0)$.

Исходя из соображений, что в каждой фокальной плоскости ДЛ строит главное изображение подобно тонкой линзе, для которой изображением бесконечно удаленного объекта является функция рассеяния точки (ФРТ), то интенсивность главного изображения в i -ой фокальной плоскости $I_i(r_0)$ можно представить в виде нормированной ФРТ, которая для ди-

фракционно-ограниченной системы имеет вид [9]:

$$I_i(r_0) = \left[2 \frac{J_1\left(\frac{2\pi r_0 R}{\lambda f_i}\right)}{\frac{2\pi r_0 R}{\lambda f_i}} \right]^2, \quad (1)$$

где $R = D/2$; λ – длина волны света; f_i – фокусное расстояние ДЛ для i -ой фокальной плоскости.

Фоновое изображение в i -ой фокальной плоскости является суммой фоновых изображений от соседних фокальных плоскостей (рисунок 1). Интенсивность фонового изображения $I_{BG}(r_0)$ определяется световой эффективностью в каждой из фокальных плоскостей. Поскольку эти эффективности равны (составляют по 30 % для каждой фокальной плоскости), то в каждой фокальной плоскости объем под кривой $I_{BG}(r_0)$ будет в два раза больше объема под кривой $I_i(r_0)$ (рисунок 2).

Будем считать, что интенсивность фонового изображения в пределах занимаемой им площади имеет неравномерное распределение. Неравномерность интенсивности фона от j -ой фокальной плоскости определим из соображений, что по форме интенсивность фона должна быть подобна форме интенсивности главного изображения, а ее первый минимум должен находиться на границе существования фона. Например, для главной фокальной плоскости F_1 первый минимум фоновой интенсивности от фокальной плоскости F_0 находится в точке r_{10} , а от F_2 – в точке r_{12} . Исходя из приведенных рассуждений получено выражение распределения интенсивности фона в заданной i -ой фокальной плоскости от фоновой j -ой фокальной плоскости

$$I_{BG}(r_0)_{ij} = \left[2 \frac{J_1\left(\frac{2\pi r_0 R}{\lambda f_i} \frac{r_i}{r_{ij}}\right)}{\frac{2\pi r_0 R}{\lambda f_i}} \right]^2, \quad (2)$$

где r_i – радиус кружка Эйри главного изображения в i -ой фокальной плоскости.

Используя выражения (1) и (2) рассчитаны МПФ данной ДЛ в трех фокальных плоскостях без учета фоновой засветки, эффективность которой составляет 10 %. Поскольку полученные графики практически совпали, то в статье представлена только МПФ для нулевой фокальной плоскости (рисунок 3, сплошная кривая). Полученный результат подтверждает, что контраст на низких пространственных частотах пропорционален дифракционной эффективности изображения, что соответствует результатам работ [5, 6].

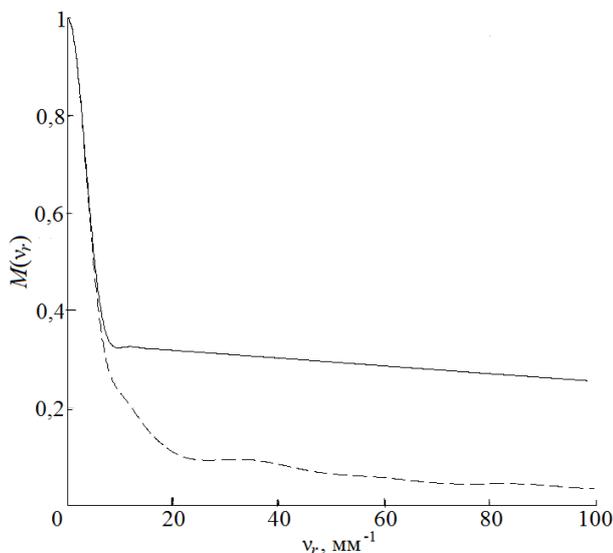


Рисунок 3 – Модуляционная передаточная функция дифракционной линзы в нулевой фокальной плоскости с учетом (пунктирная кривая) и без учета (сплошная кривая) сферической аберрации

Первая сумма Зейделя ДЛ для расчетной длины волны вычисляется с помощью следующего выражения [7]:

$$S_I = \frac{R^4}{f^3}. \quad (3)$$

Тогда при условии, что $f = f_0$, сферическая аберрация представленной ДЛ составляет $S_I = 0,013 \text{ мм}$. Для вычисления аберрационной ФРТ ДЛ в программе «ZEMAX» была смоделирована тонкая рефракционная линза, которая имеет такие же фокусное расстояние, световой диаметр и сферическую аберрацию. Полученная аберрационная ФРТ была использована для расчета МПФ ДЛ в нулевой фокальной плоскости (рисунок 3, пунктирная кривая).

Как видно из рисунка 3 сферическая аберрация ДЛ значительно ухудшает качество изображения, что необходимо учитывать при проектировании рефракционной части интраокулярных линз.

Таким образом, предложенный метод вычисления МПФ является удобным инструментом для оценки качества как аберрационных, так и безаберрационных изображений, создаваемых мультифокальной дифракционной линзой.

Заключение

Предложенный метод вычисления модуляционной передаточной функции мультифокальной дифракционной линзы при наличии фона позволяет достаточно быстро провести оценку качества изображений, создаваемых таким элементом. В основу метода положено разбиение сложного изображения на более простые составляющие, за счет чего удалось значительно упростить процедуру вычисления модуляционной передаточной функции. Использованный способ определения интенсивности фона главного изображения на основании геометрии фокусирования света в различные дифракционные порядки с определенной эффективностью предоставляет разработчикам новые степени свободы, поскольку дает возможность определить зависимость контраста изображений дифракционного элемента от распределения интенсивности фона.

Полученные предложенным методом графики модуляционной передаточной функции трифокальной дифракционной линзы позволяют оценить качество ее изображений. Как оказалось, влияние сферической аберрации дифракционной линзы на качество изображения достаточно существенно, что должно быть учтено при проектировании дифракционной интраокулярной линзы.

Список использованных источников

1. Колобродов, В.Г. Проектирование дифракционных оптических элементов и систем / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик. – К. : НТУУ «КПИ», 2012. – 196 с.
2. O'Shea, D.C. Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test / D.C. O'Shea, T.J. Suleski, A.D. Kathman, D.W. Prather. – Washington: SPIE-Press, 2004. – 254 p.

3. *Micro-optics elements, systems and applications* / ed. H.P. Herzig. – London: Taylor and Francis, 1997. – 359 p.
4. Коронкевич, В.П. Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных линз / В. П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А.Г. Полещук и др. // Компьютерная оптика. – 2008. – № 1. – Т. 32. – С. 50–58.
5. Buralli, D. A. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses / D. A. Buralli, G. M. Morris // *Applied Optics*. – 1992. – Vol. 31, № 22. – P. 4389–4386.
6. Castignoles, F. Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs / F. Castignoles, M. Flury, T. Lepine // *Optics express*. – 2010. – Vol. 18, № 5. – P. 5245–5256.
7. Колобродов, В.Г. Монохроматические аберрации киноформного элемента / В.Г. Колобродов, Е.А. Серый // Научные вести НТУУ «КПИ». – 2010. – №2. – С. 126–129.
8. Valle, P. J. Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses / P. J. Valle, J. E. Oti, V. F. Canales, M. P. Cagigal // *Optics express*. – 2005. – Vol. 13, № 7. – P. 2782–2792.
9. Колобродов, В.Г. Дифракционная теория оптических систем / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик. – К.: НТУУ «КПИ», 2011. – 148 с.

QUALITY ASSESSMENT OF MULTIFOCAL DIFFRACTIVE LENS IMAGES

Kolobrodov V.G., Timchik G.S, Siryi Ie.A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine
e-mail: ievgenii.siryi@gmail.com

Abstract. The method of trifocal diffractive lens images quality assessment in the presence of the background illumination is proposed. The background component with nonuniform intensity distribution is modeled. The effect of diffractive lens light efficiency and spherical aberration on the image contrast is presented.

Keywords: multifocal diffractive lens, modulation transfer function, spherical aberration.

References

1. Kolobrodov V.G., Timchik G.S. *Proektirovaniye difraktsionnykh opticheskikh elementov i system* [Design of diffractive optical elements and systems]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2012. 196 p. (in Russian).
2. O'Shea D.C., Suleski T.J., Kathman A.D., Prather D.W. *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test*. Washington, SPIE-Press Publ., 2004. 254 p.
3. *Micro-optics elements, systems and applications*. Ed by Herzig H.P. London, Taylor and Francis Publ., 1997. 359 p.
4. Koronkevich V.P, Lenkova G.A., Korol'kov A.G., Poleschuk A.G. and other. [New generation of bifocal diffractive-refractive lenses]. *Kompyuternaya optika*, 2008, vol. 32, no. 1, pp. 50–58. (in Russian).
5. Buralli D.A., Morris G.M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses. *Applied Optics*, 1992, vol. 31, no. 22, pp. 4389–4386.
6. Castignoles F., Flury M., Lepine T. Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs. *Optics express*, 2010, vol. 18, no. 5. pp. 5245–5256.
7. Kolobrodov V.G., Siryi Ie.A. Monochromatic aberration of kinoform element. *Research Bulletin of NTUU «KPI»*, 2011, no. 5. pp. 126–129 (in Ukrainian).
8. Valle P.J., Oti J.E., Canales V.F., Cagigal M.P. Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses. *Optics express*, 2005, vol. 13, no. 7. pp. 2782–2792.
9. Kolobrodov V.G., Timchik G.S. *Difraktsionnaya teoriya opticheskikh sistem* [The diffraction theory of optical systems]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2011. 148p. (in Russian).

Поступила в редакцию 27.02.2014.