

ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПОДИЗИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИЕЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Б. И. Агафонов, А. С. Герчиков и Ю. Р. Павленко

Для аподизированных оптических систем, имеющих сферическую aberrацию третьего порядка, рассчитаны частотно-контрастные характеристики при наличии в выходном зрачке амплитудных фильтров двух типов: 1) повышающих контраст в области низких частот, 2) повышающих контраст в области высоких частот.

Известны работы, в которых рассчитаны частотно-контрастные характеристики некоторых аподизированных оптических систем без учета aberrаций [1, 2] и с учетом дефокусировки [3].

Целью настоящей работы является изучение влияния амплитудного аподизирующего фильтра на частотно-контрастную характеристику оптической системы со сферической aberrацией третьего порядка при монохроматическом некогерентном освещении.

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения, относящиеся к рассматриваемой оптической системе: r — полярная координата точки в плоскости выходного зрачка; λ — длина волны света; R — расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости изображения; a — радиус выходного зрачка; x — координата точки в плоскости изображения; $\beta = 2\pi r/\lambda R$ — приведенная координата точки в плоскости выходного зрачка; $F(\beta)$ — функция распределения амплитуды света на выходном зрачке.

Как известно [4], функция рассеяния интенсивности в изображении бесконечно удаленного объекта $S(x)$ связана с распределением $F(\beta)$ и aberrационной функцией оптической системы с круговой симметрией $\Delta(\beta)$ соотношением

$$S(x) = A \left| \int_0^{\beta_0} F(\beta) \exp[ik\Delta(\beta)] J_0(\beta x) \beta d\beta \right|^2, \quad (1)$$

где A — постоянная, $\beta_0 = 2\pi/\lambda \cdot a/R$, $k = 2\pi/\lambda$, $J_0(\beta x)$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Тогда частотно-контрастная характеристика рассматриваемой оптической системы $|\tau(\omega)|$ будет определяться выражением

$$|\tau(\omega)| = \left| \frac{\int_0^\infty S(x) J_0(\omega x) x dx}{\int_0^\infty S(x) x dx} \right|. \quad (2)$$

Сферическую aberrацию третьего порядка можно учесть, введя в формулу (1) величину

$$\Delta(\beta) = c \left[\left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^4 - 2\mu \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Здесь величина s характеризует предельное значение сферической аберрации, параметр μ определяет положение плоскости изображения между параксиальным фокусом ($\mu=0$) и фокусом для крайних лучей ($\mu=1$).

Выбор значения μ зависит от критерия качества изображения, получаемого при дефокусировке. Имеются критерии качества изображения, основанные на использовании частотно-контрастной характеристики оптической системы [5].

В данной работе для оценки эффективности действия исследуемого распределения $F(\beta)$ на частотно-контрастную характеристику оптической

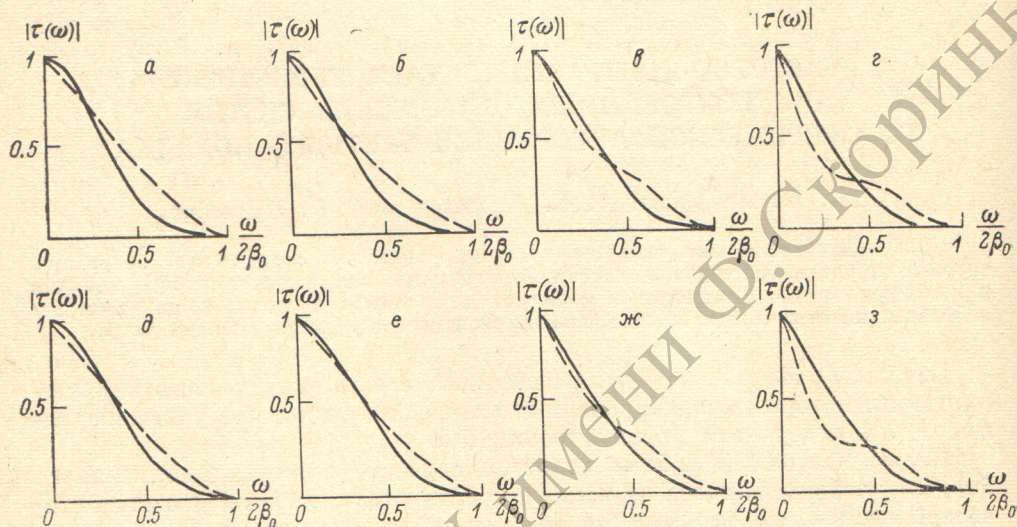


Рис. 1. Частотно-контрастные характеристики оптических систем с распределением амплитуды на выходном зрачке первого типа и различными значениями сферической аберрации.

$F(\beta)=1-(\beta/\beta_0)^2$; а — $s=0$, б — 0.5λ , в — 1.0λ , г — 1.5λ ; $F(\beta)=1-(\beta/\beta_0)^2$; д — $s=0$, е — 0.5λ , ж — 1.0λ , з — 1.5λ .

системы используется критерий оптимизации $\eta(\omega_1, \omega_2)$

$$\eta(\omega_1, \omega_2) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |\tau(\omega)| d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |\tau_0(\omega)| d\omega}, \quad (4)$$

где $|\tau_0(\omega)|$ — частотно-контрастная характеристика неаподизированной оптической системы, т. е. при $F(\beta)=1$; (ω_1, ω_2) — диапазон пространственных частот, где требуется оценить эффективность воздействия заданного распределения $F(\beta)$.

Таким образом, задавая различные значения μ в уравнении (3) с помощью критерия (4), можно выбрать оптимальное значение параметра дефокусировки μ при заданных волновой аберрации s и распределении $F(\beta)$. При этом значение η должно быть максимальным. Оптимальному положению фокуса неаподизированной системы в случае малых аберраций соответствует значение $\mu=0.5$ [4], которое и использовалось в расчете $|\tau_0(\omega)|$.

Расчет частотно-контрастных характеристик по изложенной выше схеме проводился для следующих двух типов распределения амплитуды на выходном зрачке $F(\beta)$:

первого типа

$$F(\beta) = 1 - \frac{\beta}{\beta_0}, \quad (5)$$

$$F(\beta) = 1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^2, \quad (6)$$

второго типа

$$F(\beta) = \frac{\beta}{\beta_0}, \quad (7)$$

$$F(\beta) = \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^2. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета частотно-контрастных характеристик оптических систем со сферической aberrацией третьего порядка ($c=0, 0.5\lambda, \lambda, 1.5\lambda$) при $F(\beta)$, имеющем вид (5) и (6), что соответствует убыванию амплитуды от центра к краю зрачка. Для сравнения на рисунке штриховыми кривыми представлены частотно-контрастные характеристики таких же систем, но при $F(\beta)=1$. Как показывает расчет, частотно-

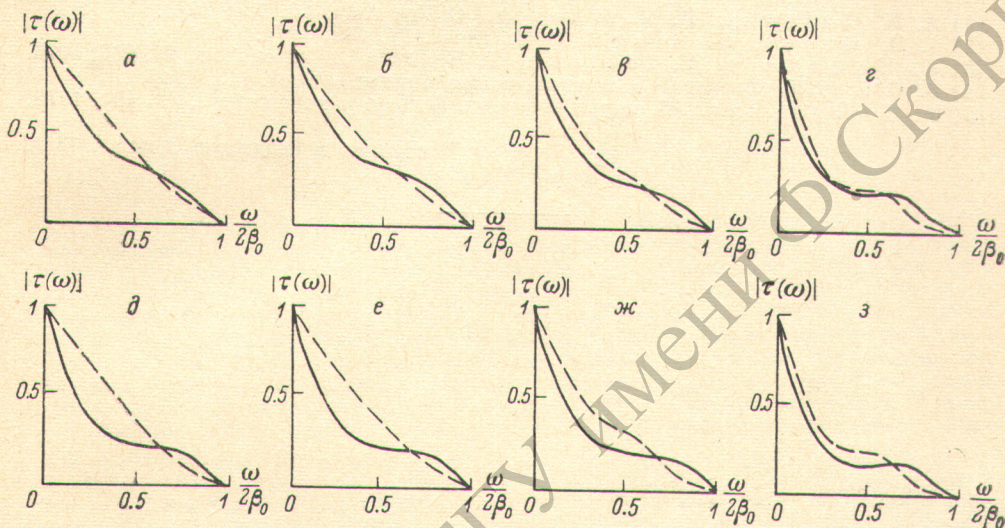


Рис. 2. Частотно-контрастные характеристики оптических систем с распределением амплитуды на выходном зрачке второго типа и различными значениями сферической aberrации.

$F(\beta) = (\beta/\beta_0)$; а — $c=0$, б — 0.5λ , в — 1.0λ , г — 1.5λ ; $F(\beta) = (\beta/\beta_0)^2$; д — $c=0$, е — 0.5λ , ж — 1.0λ , з — 1.5λ .

контрастные характеристики систем первого типа в области малых пространственных частот выше, чем у соответствующих неаподизированных систем. При этом увеличение значения aberrации с соответствует увеличению значения $\eta(\omega_1, \omega_2)$ в области малых пространственных частот. Оптимальное положение плоскости изображения в случае распределения (5) достигается при $\mu_{\text{опт.}} \approx 0.35$, а для распределения (6) — при $\mu_{\text{опт.}} \approx 0.4$ ($c \neq 0$).

На рис. 2 представлены результаты расчета частотно-контрастных характеристик оптических систем с теми же значениями сферической aberrации третьего порядка, что и в предыдущем случае, но здесь $F(\beta)$ имеет вид (7) и (8), что соответствует возрастанию амплитуды от центра к краю зрачка. Можно видеть, что системы второго типа имеют частотно-контрастные характеристики, превышающие в области высоких пространственных частот частотно-контрастные характеристики соответствующих неаподизированных систем. При этом значения величины $\eta(\omega_1, \omega_2)$ в области высоких пространственных частот возрастают с увеличением aberrации c . Оптимальное положение плоскости изображения в случае распределения (7) соответствует значению $\mu_{\text{опт.}} \approx 0.55$, а в случае распределения (8) — $\mu_{\text{опт.}} \approx 0.6$ ($c \neq 0$).

Таким образом, рассмотрение аподизированной оптической системы со сферической aberrацией третьего порядка показывает, что ее частотно-контрастная характеристика имеет тот же характер, что и для системы

без аберраций. Однако эффективность действия рассмотренных распределений амплитуды на зрачке оптической системы возрастает при наличии аберраций, причем оптимальное положение плоскости изображения изменяется относительно соответствующего положения для неаподизированной системы в направлении, зависящем от типа распределения на выходном зрачке.

Следует отметить, что применение амплитудных аподизирующих фильтров снижает физическую светосилу оптической системы. Освещенность в центре поля зрения, например, при относительном отверстии 1 : 5 для распределений (5) — (8) уменьшается соответственно в 6, 3, 2 и 3 раза.

Литература

- [1] A. K. Jaiswal, R. K. Bhogra. *Optica Acta*, 20, 965, 1973.
- [2] S. D. Gupta, M. Singh. *Optica Acta*, 21, 737, 1974.
- [3] K. Yamamoto, Y. Ichioka, T. Suzuki. *Optica Acta*, 23, 965, 1976.
- [4] Э. О'Нейл. Введение в статистическую оптику. «Мир», М., 1966.
- [5] М. Я. Ш у л ь м а н. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 19, 401, 1974.

Поступило в Редакцию 3 мая 1978 г.