

О ДОПУСКАХ НА ДВОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

С. А. РОДИОНОВ, М. Н. СОКОЛЬСКИЙ

Приводится формула для частотно-контрастной характеристики оптической системы при наличии двоения изображения. Применение формулы иллюстрируется на примере расчета допуска на угол крыши прямоугольной призмы.

Двоение изображения в оптических приборах, содержащих призмённые системы, возникает чаще всего из-за погрешности в изготовлении угла «крыши». Для назначения обоснованного допуска на изготовление «крыши» необходимо рассмотреть влияние двоения на качество изображения. В современной теории основной оценкой качества изображения является частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) [1]. Найдем влияние двоения на ЧКХ оптической системы.

Пусть $h(y)$ – функция рассеяния точки (ФРТ) некоторой оптической системы, описывающая распределение интенсивности в изображении точки, и $D(\omega)$ – оптическая передаточная функция (ОПФ), связанная с $h(y)$ через преобразование Фурье [1]:

$$D(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(y) \exp[2\pi i \omega y] dy, \quad (1)$$

где ω – пространственная частота. ЧКХ представляет собой модуль ОПФ. При наличии двоения $2\Delta y$ ФРТ $h_1(y)$ оптической системы примет вид:

$$h_1(y) = \frac{1}{2} [h(y - \Delta y) + h(y + \Delta y)], \quad (2)$$

а ее ОПФ $D_1(\omega)$ в соответствии со свойствами преобразования Фурье [2] будет:

$$D_1(\omega) = D(\omega) \cos[2\pi \Delta y \omega] = D(\omega) D_{\text{дв}}(\omega), \quad (3)$$

где $D_{\text{дв}}(\omega) = \cos[2\pi \Delta y \omega]$ – множитель, зависящий только от двоения. $D_{\text{дв}}(\omega)$ можно рассматривать как «ОПФ двоения», описывающую передаточные характеристики такого самостоятельного процесса преобразования изображения, как двоение. Выражение (3) показывает, что ОПФ, а следовательно, и ЧКХ любого прибора при наличии двоения равна произведению ЧКХ прибора без двоения $|D(\omega)|$ на ОПФ двоения $D_{\text{дв}}(\omega)$. Из (3) можно получить допуск на двоение, если задаться значением ОПФ двоения на какой-либо пространственной частоте ω_0 . Если полагать, что двоение изображения не должно ухудшать ЧКХ оптической системы на частоте ω_0 более чем на 20%, тогда

$$D_{\text{дв}}(\omega_0) = \cos[2\pi \Delta y \omega_0] \geq 0,8. \quad (4)$$

Отсюда допуск на двоение изображения принимает вид

$$\Delta y \leq \frac{0,1}{\omega_0}. \quad (5)$$

В качестве примера определим допуск на отклонение δ от прямого угла крыши прямоугольной призмы с крышей. Будем предполагать, что призма установлена перед оптической системой и работает в параллельном ходе лучей. Выразим двоение $2\Delta y$ и частоту ω_0 , величину которой следует принимать равной половине предельной частоты $\omega_{пред}$, в угловых единицах, приведенных в пространство объекта. При этом могут встретиться два случая. Наиболее распространенным является случай визуальных оптических систем, работающих с глазом. Для этих систем $\omega_{пред}$ определяется по формуле:

$$\omega_{пред} = \frac{D}{\lambda}, \quad (6)$$

где D – диаметр рабочего пучка на призме (в мм); λ – длина волны света.

Подставляя (6) в (5) при $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм для угловой величины двоения изображения, получаем:

$$[\Delta y]'' \leq \frac{10}{D}. \quad (7)$$

Для системы с не визуальной (например, фотографической, фотоэлектрической) регистрацией изображения объекта $\omega_{пред}$ определяется предельной частотой $\nu_{пред}$ разрешения приемника. Тогда для $[\Delta y]''$ получаем:

$$[\Delta y]'' \leq \frac{4 \cdot 10^4}{\nu_{пред} f'}. \quad (8)$$

f' – фокусное расстояние оптической системы.

При выводе выражений (7) и (8) предполагалось, что призма с крышей, вносящая двоение, стоит перед объективом в параллельном ходе, нетрудно убедиться, что эти выражения справедливы и в общем случае расположения призмы, в том числе и после объектива в сходящемся ходе. В последнем случае необходимо в выражении (7) под D понимать диаметр рабочего пучка в плоскости ребра крыши призмы (рабочим пучком здесь называется, как это общепринято, пучок, исходящий из осевой точки предмета и ограниченный апертурной диафрагмой или зрачком глаза), а в выражении (8) под f' понимать расстояние вдоль луча от ребра крыши до поверхности изображения.

При определении диаметра рабочего пучка в выражениях (6), (7) принимается, что визуальная система работает в нормальных условиях освещенности и со стандартным глазом, зрачок которого принимается равным 2 мм. Таким образом, если выходной зрачок прибора больше 2 мм, то эффективный выходной зрачок ограничивается глазом и принимается равным 2 мм. Величина 2 мм взята потому, что при таком диаметре средняя предельная частота стандартного глаза близка к теоретической, найденной по формуле (6).

По определению А. И. Тудоровского [3] угловое двоение, вносимое призмой, можно записать как

$$[2\Delta y]'' = \frac{4\sqrt{6}}{3}n[\delta]'' \approx 5[\delta]'' \quad (9)$$

где n – показатель преломления материала призмы ($n \approx 1.5$).

После подстановки (9) в (7) и (8) получаем допуски на углы крыши:
для визуальных систем

$$[\delta_v]'' \leq \frac{4}{D}, \quad (10)$$

для фотографической системы

$$[\delta_\phi] \leq \frac{1,6 \cdot 10^4}{v_{\text{пред}} f'}. \quad (11)$$

Например, пусть $D = 20\text{мм}$, $f' = 100\text{мм}$, $v_{\text{пред}} = 100 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}$, тогда $\delta_v \leq 0.''2$; $\delta_\phi \leq 1.''6$.

1. ЛИТЕРАТУРА

1. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения, Изд-во «Мир», 1964.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Изд-во «Наука», 1968.
3. Тудоровский А. И. Влияние ошибок изготовления отражательных призм на ход лучей в них. ЖТФ, 1934, т. IV, вып. 4.