

# ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ПЕРВИЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

© 2010 г. А. А. Шаров

ОАО “Лыткаринский завод оптического стекла”, г. Лыткарино, Московская область

E-mail: lzos-22@mail.ru

Предлагается простой метод и критерий оценки качества изображения оптических систем, который может применяться при технологическом контроле объективов в производственных условиях. Метод основан на свойствах aberrаций оптических систем.

**Ключевые слова:** aberrация, дифракционная точка, оптическая система, функция передачи модуляции.

Коды OCIS: 220.0220, 220.1010, 220.4840.

Поступила в редакцию 17.06.2009.

Для широкого класса современных оптических систем, таких как объективы устройств цифровой фотографии и видеосъемки, приборов ночного видения и ряда других, требуется оценка качества их изображения по функции передачи модуляции (ФПМ). Несмотря на высокий уровень автоматизации современной аппаратуры контроля ФПМ, ее эксплуатация требует специальной подготовки и высокой квалификации измерителя.

При сборке оптической системы в серийном производстве для промежуточного технологического контроля необходимы существенно более простые приборы и критерии оценки качества изображения, которыми мог бы свободно оперировать непосредственно рабочий-сборщик. Один из таких критериев, широко распространенный в производственной практике, – визуальная разрешающая способность, оцениваемая по штриховой мере, – дает удовлетворительный результат лишь применительно к системам с качеством изображения, близким к дифракционному пределу. Кроме того, данный критерий не позволяет судить о качестве изображения системы в нужном диапазоне пространственных частот. Для систем, имеющих допустимые остаточные aberrации порядка длины световой волны и более, попытки ввести требование по визуальному разрешению, выполнение которого гарантировало бы соответствие требованиям по ФПМ на низких пространственных частотах, приводят к необходимости назначения неоправданно жестких допусков на изготовление деталей и сборку системы.

Другой возможностью оценить качество изготовленной оптической системы является

исследование aberrаций, зная которые можно спрогнозировать уровень ФПМ. Использование для измерений интерференционного метода или метода визуальных фокусировок в данном случае нецелесообразно из-за их трудоемкости. Самым простым и наглядным является метод исследования aberrаций по виду изображения дифракционной точки, однако при традиционном подходе с его помощью трудно дать количественную оценку той или иной ошибки, присущей данной системе. Дело в том, что глаз человека не приспособлен к определению абсолютной освещенности в дифракционных кольцах и часто не обнаруживает разницы между изображениями двух систем с различным уровнем ошибок.

Тем не менее, возможно реализовать простой метод количественной оценки первичных aberrаций оптической системы (aberrаций третьего порядка) по виду изображения дифракционной точки или по разрешению штрихов меры. Этот метод может быть использован при технологическом контроле объективов в производственных условиях. Предлагаемый метод основан на свойствах aberrаций оптических систем.

Выражения для отдельных первичных монохроматических волновых aberrаций оптической системы с круглым зрачком могут быть получены при разложении функции aberrаций в степенной ряд. В полярных координатах  $(\rho, \theta)$  на зрачке это разложение имеет вид [1]

$$W(\rho, \theta) = \sum_n \sum_m W_{nm} \rho^n \cos^m \theta, \quad (1)$$

где  $W_{nm}$  – коэффициент разложения, характеризующий каждую отдельную волновую aberrацию;

$n \geq m$ ,  $n + m$  – четное число, указывающее на порядок aberrации;  $\rho$  – радиус зрачка  $0 \leq \rho \leq 1$ .

В соответствии с разложением (1) выражения для отдельных первичных aberrаций записываются следующим образом [1]:

сферическая aberrация

$$W_{\text{сф}}(\rho, \theta) = W_{40}\rho^4, \quad (2)$$

кома

$$W_{\text{к}}(\rho, \theta) = W_{31}\rho^3 \cos \theta, \quad (3)$$

астигматизм

$$W_{\text{а}}(\rho, \theta) = W_{22}\rho^2 \cos^2 \theta, \quad (4)$$

где  $W_{40}$ ,  $W_{31}$ ,  $W_{22}$  – коэффициенты первичных волновых aberrаций (сферической aberrации, комы и астигматизма соответственно).

В [1] на основании условия Марешаля определены максимально допустимые значения первичных aberrаций  $|W^D|$  относительно плоскости Гаусса:

сферической aberrации

$$|W_{40}| = 0,94\lambda = |W^D|_{\text{сф}}, \quad (5)$$

комы

$$|W_{31}| = 0,60\lambda = |W^D|_{\text{к}}, \quad (6)$$

астигматизма

$$|W_{22}| = 0,35\lambda = |W^D|_{\text{а}}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – длина волны света.

Рассматривая изображение дифракционной точки, формируемое исследуемой оптической системой, легко распознать те или иные присущие ей aberrации. Величину же aberrации, характерной для данной оптической системы, можно оценить, диафрагмируя зрачок объектива до тех пор, пока изображение точки не будет отличаться от идеального. Таким путем можно определить максимально допустимый радиус зрачка  $\rho_0$ , при котором еще будут выполняться условия (5)–(7), после чего, воспользовавшись соотношениями (2)–(4), нетрудно вычислить значение aberrации для полного зрачка (при  $\rho = 1$ ).

В общем виде выражение для вычисления коэффициента волновой aberrации можно записать как

$$|W_{nm}| = |W^D|/\rho_0^n. \quad (8)$$

При известном типе ошибки в качестве тест-объекта для определения величины  $\rho_0$  удобно воспользоваться штриховой мишенью.

Тот же подход может быть применен для оценки aberrаций систем с центральным экра-

нированием. При этом, однако, следует учитывать, что среднее квадратическое отклонение (СКО) волнового фронта в общем случае зависит от относительного диаметра экрана  $\varepsilon$ . Соответствующее уравнение, полученное Лерманом [2] и связывающее СКО волнового фронта с коэффициентами разложения волновой aberrации при наличии центрального экранирования, целиком здесь не приводится ввиду его громоздкости. В качестве примера ограничимся лишь рассмотрением наиболее интересного с практической точки зрения случая, когда в системе присутствует aberrация типа комы, поскольку кома, наблюдаемая в точке на оси системы, однозначно указывает на самую распространенную ошибку сборки – децентрирование оптических поверхностей. Уравнение Лермана в случае наличия только комы и поперечного смещения будет иметь вид

$$W_{\text{СКВ}}^2 = (1 + \varepsilon^2)W_{11}^2/4 + (1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4)W_{11}W_{31}/3 + (1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4 + \varepsilon^6)W_{31}^2/8,$$

где  $W_{\text{СКВ}}$  – СКО волнового фронта контролируемой системы,  $W_{11}$  – коэффициент разложения волновой aberrации, характеризующий поперечное смещение.

При значениях  $\varepsilon < 0,6$  слагаемыми, содержащими  $\varepsilon^4$  и  $\varepsilon^6$ , в первом приближении можно пренебречь. Тогда

$$W_{\text{СКВ}}^2 \approx (1 + \varepsilon^2)[W_{11}^2/4 + W_{11}W_{31}/3 + W_{31}^2/8]. \quad (9)$$

Минимизируя выражение (9), для плоскости наилучшей установки находим

$$\partial W_{\text{СКВ}}^2 / \partial W_{11} = (1 + \varepsilon^2)[W_{11}/2 + W_{31}/3] = 0,$$

откуда

$$W_{11} = -2W_{31}/3. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) и применяя критерий Марешаля, имеем

$$W_{\text{СКВ}}^2 \approx (1 + \varepsilon^2)W_{31}^2/72 \leq \lambda^2/196. \quad (11)$$

Из формулы (11) определяем допустимое значение коэффициента комы при наличии центрального экранирования

$$W_{31} \approx 0,6\lambda/\sqrt{1 + \varepsilon^2} = |W^D|_{\text{к}}.$$

Таким образом, принимая во внимание, что  $\varepsilon = \rho_3/\rho$ , где  $\rho_3$  – радиус экрана, выражение (8) для рассматриваемого случая можно представить в виде

$$|W_{31}| = |W^D|_{\text{к}}/\rho_0^3 \approx 0,6\lambda/(\rho_0^3\sqrt{1 + (\rho_3/\rho_0)^2}).$$

По найденным в результате измерений значениям коэффициентов волновой aberrации можно спрогнозировать уровень ФПМ оптической системы с использованием существующих расчетных программ [3].

На практике для проведения оперативного контроля целесообразно ограничиться установлением допусков на отдельные aberrации конкретной системы, выраженные в соответствующих значениях  $\rho_0$ .

Чтобы оценить порог чувствительности предложенного метода, проведем грубую оценку среднего контраста изображения в системе с круглым зрачком, для чего воспользуемся статистической моделью функции снижения ФПМ О'Нейла [2]:

$$T(s)/T_0(s) = \exp \left\{ - (2\pi W_{\text{СКВ}}/\lambda)^2 [1 - \varphi_{11}(s)] \right\}, \quad (12)$$

где  $T_0(s)$  – ФПМ дифракционной системы,  $T(s)$  – ФПМ контролируемой системы,  $s$  – каноническая пространственная частота,  $\varphi_{11}(s)$  – автокорреляционная функция волновой aberrации, которая на средних пространственных частотах ( $s \approx 1,0$ ) близка к нулю.

Поскольку средняя квадратическая величина  $W_{\text{СКВ}}$  для каждого вида aberrаций связана с соответствующим параметром  $|W_{nm}|$  через постоянный коэффициент [1, 3], то, с учетом характера зависимости (8), формулу (12) для средних пространственных частот можно переписать в виде

$$T(s)/T_0(s) = \exp \left[ -4\pi^2 / (196\rho_0^{2n}) \right], \quad (13)$$

где  $1/196 = (W_{\text{СКВ}}^{\text{II}}/\lambda)^2$  – предельно допустимое значение СКО волнового фронта в соответствии с критерием Марешаля.

Заменим формулу (13) приближенной (полученной разложением экспоненты в ряд)

$$T(s)/T_0(s) \approx (1 - 0,2/\rho_0^{2n}).$$

Тогда для погрешности определения контраста  $\Delta T$  имеем

$$\Delta T \approx (\partial T / \partial \rho_0) \Delta \rho_0 = T_0 (0,4n/\rho_0^{2n+1}) \Delta \rho_0,$$

для относительной погрешности

$$\Delta T / T \approx (0,4n/\rho_0^{2n}) (\Delta \rho_0 / \rho_0), \quad (14)$$

где  $\Delta \rho_0$  – погрешность определения  $\rho_0$ .

В случае использования в качестве тест-объекта штриховой миры чувствительность метода будет ограничена дискретностью  $\Delta N$  изменения числа штрихов миры  $N$  при переходе от элемента к элементу ( $\Delta \rho_0 / \rho_0 \approx \Delta N / N$ ). В стандартной штриховой миры эта дискретность составляет примерно 6%.

Таким образом, минимальная относительная погрешность оценки контраста согласно (14) составит от 5 до 10% в зависимости от вида aberrации. С одной стороны, при больших значениях aberrаций, когда  $\rho_0$  получается малым, погрешность измерений возрастает. С другой стороны, для интересующей нас области низких пространственных частот, входящая в формулу (12) величина  $[1 - \varphi_{11}(s)]$  приближается к нулю и чувствительность контроля повышается.

Описанная методика возникла как результат экспериментальной работы по внедрению в серийное производство светосильного объектива, работающего с электронно-оптическим преобразователем, когда было обнаружено, что принятый технологический критерий визуального разрешения не обеспечивает совпадения с данными контроля ФПМ примерно для 50% объективов. В частности, два объектива, имеющие одинаковое визуальное разрешение 1064 лин/мм имели существенно различные значения коэффициента передачи модуляции на рабочей пространственной частоте 30 лин/мм, а именно 0,20 и 0,53. Попытка ужесточить требование к визуальному разрешению привела бы к необходимости значительно сузить допуски на изготовление оптических деталей и сборку объектива и неоправданно увеличила бы себестоимость производства.

В ходе анализа было выявлено, что объективы, формирующие “дифракционное” изображение точки при определенном диафрагмировании зрачка, как правило, оказываются годными по ФПМ. Позднее было установлено, что в зависимости от характера преобладающей ошибки степень диафрагмирования может быть разной.

В таблице представлены данные контроля качества изображения партии объективов, которые расположены в порядке уменьшения величины  $W_{\text{СКВ}}^2$ , оцененной для длины волны 640 нм (основной для рассматриваемого объектива) в результате определения коэффициентов сферической aberrации, комы и астигматизма ( $|W_{40}|$ ,  $|W_{31}|$  и  $|W_{22}|$ ) по соответствующим диаметрам дифракционного изображения  $\rho_0^{\text{сф}}$ ,  $\rho_0^{\text{к}}$  и  $\rho_0^{\text{а}}$ . Так как нет возможности представить измеренные aberrации полиномами вида (2)–(4), значения  $W_{\text{СКВ}}^2$  вычислялись как сумма квадратов СКО волнового фронта для отдельных aberrаций. Одновременно проводился непосредственный контроль коэффициента передачи модуляции (КПМ) объективов  $T$  на рабочей пространственной частоте 30 лин/мм. Поскольку предполагаемая связь измеренных волновых aberrаций со значениями

КПМ имеет вид (12), то для построения линейного уравнения регрессии

$$\hat{T} = \alpha + \beta x, \quad (15)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные коэффициенты, в качестве аргумента используем величину  $x = \exp(-W_{\text{СКВ}}^2)$ .

В таблице приводятся вычисленные в результате аппроксимации измерительных данных уравнением вида (15) оценки  $\hat{T}$  для КПМ и разности  $\delta = T - \hat{T}$ , рассеяние которых характеризует случайную погрешность измерений.

Проверка гипотезы о нормальности распределения значений  $\delta$ , выполненная по составному критерию [4] с результирующим уровнем значимости  $q = 0,04$ , дала положительный результат. Следовательно, как показано в [5], величину  $ns^{*2}/\sigma^2$  можно считать распределенной независимо от  $\alpha$  и  $\beta$  по закону  $\chi^2$  с  $n - 2$  степенями свободы. Здесь

$$s^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 / n}$$

– смещенная экспериментальная оценка СКО результатов измерений,  $\sigma$  – среднеквадратическое значение погрешности измерений (СКО генеральной совокупности), а  $n$  – число измерений.

Ввиду того, что нас интересует наибольшее значение СКО, разумно ограничиться построением одностороннего доверительного интервала с верхней доверительной границей

$$\sigma \leq \sqrt{ns^{*2} / \chi_{(n-2)(1-P)}^2}, \quad (16)$$

где  $\chi_{(n-2), (1-P)}^2$  – квантиль  $\chi^2$ -распределения с  $n - 2$  степенями свободы, соответствующая доверительной вероятности  $P$ .

Для  $P = 0,95$  вычисление по формуле (16) дает в нашем случае  $\sigma = 0,07$  единиц контраста. От среднеквадратического значения погрешности легко перейти к доверительному:  $\Delta_P = k_P \sigma$ , где  $k_P$  – квантиль нормального распределения для доверительной вероятности  $P$ . В частности, при  $P = 0,95$  получим  $k_P = 1,96$  и для нашего случая имеем  $\Delta_{0,95} = 0,13$ . Аналогичное исследование, проведенное для пространственной частоты 15 лин/мм, дает несколько меньшее значение по-

Данные контроля качества изображения партии объективов

№ пп	$\rho_0^{\text{Ф}}$	$ W_{40} $	$\rho_0^K$	$ W_{31} $	$\rho_0^a$	$ W_{22} $	$W_{\text{СКВ}}^2$	$x = \exp(-W_{\text{СКВ}}^2)$	$T$	$\hat{T}$	$\delta$
1	1,00	0,00	0,31	19,7	1,00	0,00	5,37	0,005	0,37	0,47	-0,10
2	1,00	0,00	0,33	17,5	0,53	1,27	4,31	0,013	0,55	0,47	0,08
3	1,00	0,00	0,33	17,5	1,00	0,00	4,24	0,014	0,54	0,47	0,07
4	1,00	0,00	0,34	15,6	0,53	1,27	3,45	0,032	0,42	0,48	-0,06
5	1,00	0,00	0,34	15,6	0,76	0,60	3,40	0,033	0,53	0,48	0,05
6	1,00	0,00	0,34	15,6	1,00	0,00	3,38	0,034	0,43	0,48	-0,05
7	1,00	0,00	0,34	15,6	0,63	0,00	3,38	0,034	0,56	0,48	0,08
8	1,00	0,00	0,35	14,0	1,00	0,00	2,72	0,066	0,46	0,48	-0,02
9	1,00	0,00	0,39	10,3	1,00	0,00	1,48	0,228	0,48	0,51	-0,03
10	0,60	7,25	0,41	8,55	0,73	0,67	1,33	0,266	0,50	0,52	-0,02
11	0,51	13,6	1,00	0,00	1,00	0,00	1,03	0,357	0,52	0,53	-0,01
12	1,00	0,00	0,45	6,58	1,00	0,00	0,60	0,548	0,53	0,57	-0,04
13	0,65	5,27	0,50	4,80	1,00	0,00	0,47	0,622	0,53	0,58	-0,05
14	1,00	0,00	0,48	5,60	1,00	0,00	0,44	0,647	0,60	0,59	0,01
15	1,00	0,00	0,50	4,80	1,00	0,00	0,32	0,726	0,66	0,60	0,06
16	1,00	0,00	0,51	4,46	1,00	0,00	0,28	0,759	0,65	0,61	0,04
17	1,00	0,00	0,54	3,86	1,00	0,00	0,21	0,813	0,65	0,62	0,03
18	1,00	0,00	0,55	3,61	1,00	0,00	0,18	0,835	0,63	0,62	0,01
19	1,00	0,00	0,58	3,16	1,00	0,00	0,14	0,871	0,60	0,63	-0,03
20	1,00	0,00	0,58	3,16	1,00	0,00	0,14	0,871	0,58	0,63	-0,05
21	1,00	0,00	0,58	3,16	1,00	0,00	0,14	0,871	0,63	0,63	0,00
22	1,00	0,00	0,58	3,16	1,00	0,00	0,14	0,871	0,65	0,63	0,02
23	1,00	0,00	0,60	2,78	1,00	0,00	0,11	0,898	0,58	0,63	-0,05
24	1,00	0,00	0,60	2,78	1,00	0,00	0,11	0,898	0,69	0,63	0,06

грешности  $\Delta_{0,95} = 0,11$ . Следует иметь в виду, что в рассеяние экспериментальных результатов вносит вклад также погрешность измерения КПМ.

Уровень точности предложенного метода оценки аберраций позволяет эффективно использовать его для установления критерия годности объективов на этапе технологического контроля. Учитывая субъективную оценку, лежащую в основе метода, для получения наилучших результатов следует уточнять критерии годности объективов индивидуально для каждого оператора.

Выработанный экспериментально для рассмотренной системы критерий годности по  $\rho_0$  показал лучшее соответствие данным измерения КПМ, чем визуальная разрешающая способность, измеренная для полного зрачка; его применение позволило отказаться от промежуточного контроля КПМ на этапе сборки и юстировки объектива.

### Выводы

Качество оптических систем, работающих на низких пространственных частотах и имеющих допускаемые остаточные волновые аберрации,

превышающие длину волны, с применением критериев, основанных на использовании предложенного метода, может быть оценено более адекватно, чем по классическому критерию визуального разрешения. Оперативность и точность метода удовлетворяют требованиям, предъявляемым для предварительной оценки качества изображения таких систем на этапе сборки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
2. Проектирование оптических систем / Под ред. Шеннона Р. и Вайанта Дж. М.: Мир, 1983. 432 с.
3. Ган М.А. Автоматизация проектирования оптических систем // Оптический журнал. 1994. № 8. С. 4–12.
4. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений. М.: Издательство стандартов, 1991. 176 с.
5. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1965. 511 с.