ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. И. ВАВИЛОВА

На правах рукописи

Аспирант ЛЕНСКИЙ А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

(044, оптика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1968

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. И. ВАВИЛОВА

На правах рукописи

Аспирант ЛЕНСКИЙ А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

(044, оптика)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1968

В теории образования оптического изображения и практике оптического приборостроения важное место в последние годы заняла частотно-контрастная характеристика (ЧКХ). Это объясняется тем, что ЧКХ полностью определяет свойства оптической системы, касающиеся образования изображения, в отличие от традиционных критериев качества, таких как разрешающая способность или характеристическая яркость Штреля. С другой стороны, ЧКХ позволяет с единой точки зрения рассматривать все этапы передачи изображения сложным прибором, включающим в себя оптическую систему лишь в виде каскада. И наконец, существуют различные методы экспериментального измерения ЧКХ.

В основе современных представлений теории образования оптического изображения лежит использование в оптике методов математического аппарата Фурье. В этой области главный вклад был сделан Дюффье, частично в сотрудничестве с Лансро. В дальнейшем идеи применения аппарата Фурье в оптике развивались Г. Г. Гопкинсом и Дюмонте при построении теории образования изображения, учитывающей степень некогерентности света. ЧКХ в этой теории получается из так называемой передаточной функции или функции отклика в частном случае полной некогерентности. Перу Г. Г. Гопкинса принадлежат также общие исследования ЧКХ и ее свойств.

Диссертация посвящена исследованию связи ЧКХ с аберрациями оптической системы. Аберрации определяют систему со стороны геометрической оптики, в то время как ЧКХ учитывает явления дифракции и имеет вполне определенный физический смысл множителя передачи контраста в изображениях линейных структур с косинусоидальным распределением светности. С помощью ЧКХ можно принять во внимание различные факторы, ухудшающие качество изображения; например, падение контраста, обусловленное дефектами оптических поверхностей. Кроме того, ЧКХ входит в интегральные выражения критериев качества изображения, которые, в свою очередь, позволяют учесть совокупность предписанных системе объектов, а также свойства приемника, включая и «шум». Однако при конструировании объективов используется именно геометрическая оптика с вытекающими из нее уже хорошо установившимися и обогащенными многолетним опытом методами расчета. С геометрическими аберрациями лучей связаны также и новейшие методы автоматического расчета оптики.

Таким образом, изучение влияния аберраций на ЧКХ помогает внести в вычислительную оптику полезные физические критерии и является неотъемлемой частью проблемы оценки качества оптического изображения.

Прежде всего в диссертации сделана попытка дать более или менее полный обзор публикаций до второй половины 1967 года, касающихся влияния аберраций на ЧКХ. Сведения обзорного характера рассеяны по всем четырем главам работы, но наиболее общие вопросы рассмотрены отдельно в главе I. Это выбор координат в зрачке и учет конечных углов поля зрения, ограничения в применении ЧКХ, ее общие свойства и связь с другими методами оценки качества изображения, приближение геометрической оптики и обобщение ЧКХ на случай конечной ширины спектра излучения объекта.

Значительную роль в исследованиях ЧКХ играют численные методы расчета этой функции. Во второй главе, наряду с кратким описанием и характеристиками известных в литературе методов, предлагается видоизменение одного из них (а именно, метода Гопкинса), позволяющее автоматически поддерживать заданную точность вычисления ЧКХ практически независимо от величины аберрации. При этом в целях уменьшения объема вычислений скорость интегрирования автоматически регулируется в соответствии с характером изменения аргумента подынтегральной функции в выражении ЧКХ

$$D(s) = \frac{1}{A} \iint\limits_S \exp iksV(x,\ y;\ s)\, dx\, dy,$$

где

$$sV(x,\ y;\ s) = W\left(x + \frac{s}{2},\ y\right) - W\left(x - \frac{s}{2},\ y\right),$$

$x,\ y$ — приведенные координаты в зрачке $(0 \leqslant x,\ y \leqslant 1)$, $W(x,\ y)$ — волновая аберрация, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, A — площадь зрачка в координатах $x,\ y$; s — приведенная пространственная частота $(0 \leqslant s \leqslant 2)$. Область интегрирования S является общей частью двух областей зрачка, смещенных друг относительно друга на величину s. Формула кубатур имеет вид

$$D(s) = \frac{1}{N} \sum_p \sum_q \left\{ \frac{1}{2^{m+n}} \sum_{j=1}^{2^m} \sum_{l=1}^{2^m} e^{iZ_{p,\,q,\,j,\,l}} \frac{\sin X_{p,\,q,\,j,\,l}}{X_{p,\,q,\,j,\,l}} \times \right.$$
$$\left. \times \frac{\sin Y_{p,\,q,\,j,\,l}}{Y_{p,\,q,\,j,\,l}} \right\},$$

где $N = \frac{A}{4\varepsilon_x \varepsilon_y}$, а величины

$$Z_{p,\,q,\,j,\,l} = ksV(x_{p,\,j},\ y_{q,\,l};\ s),$$

$$X_{p,\,q,\,j,\,l} = \frac{\varepsilon_x}{2^m} ksV'_x(x_{p,\,j},\ y_{q,\,l};\ s),$$

$$Y_{p,\,q,\,j,\,l} = \frac{\varepsilon_y}{2^m} ksV'_y(x_{p,\,j},\ y_{q,\,l};\ s)$$

вычислены в точках

$$x_{p,\,j} = 2(p-1)\varepsilon_x + (2j-1)\varepsilon_x/2^m,$$

$$y_{q,\,l} = 2(q-1)\varepsilon_y + (2l-1)\varepsilon_y/2^n,$$

ε_x, ε_y — параметры численного интегрирования. Слагаемое включается в сумму, если точка $(x_{p,\,j},\ y_{q,\,l})$ принадлежит области S. $m = 0,\ 1,\ 2$, и т. д. в зависимости от того, в какой интервал $0,\ a;\ a,\ 2a;\ 2a,\ 4a$; и т. д. попадает модуль второй разности $ksV(x,\ y;\ s)$ по x. Аналогично $n = 0,\ 1,\ 2$, и т. д. в зависимости от того, в какой из интервалов $0,\ b;\ b,\ 2b;\ 2b,\ 4b$; и т. д. может быть заключен модуль второй разности $ksV(x,\ y;\ s)$ по y. Обе эти конечные разности, пропорциональные соответствующим частным производным, определяют в первом приближении величину погрешности. Выбор положительных констант a и b зависит от требуемой точности. Сохранение постоянной точности подтверждено вычислением большого количества интегралов ЧКХ на ЭЦВМ для аберраций до 10 длин волн при различных уровнях максимальной величины погрешности от —0.05 до —0.0025 (за чрезвычайно редкими исключениями погрешность всегда отрицательна).

Третья глава посвящена собственно исследованию влияния аберраций на ЧКХ. С помощью предложенного ранее численного метода здесь разобран широко распространенный на практике случай сферической аберрации третьего и пятого порядков, причем основное внимание уделено неподдающейся аналитическому рассмотрению области «средних» аберраций и «средних» падений контраста. Волновая аберрация в этом случае может быть представлена в виде:

$$W(r) = w_{20}r^2 + w_{40}r^4 + w_{60}r^6,$$

где w_{20}, w_{40}, w_{60} — коэффициенты, соответственно, дефокусировки, сферической аберрации третьего и пятого порядков, а переменная r пропорциональна синусу апертурного угла луча и изменяется от 0 в центре зрачка до 1 на его краю. Коэффициенту волновой аберрации пятого порядка w_{60} придавались значения, равные 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16 и 20 длинам волн, т. е. фиксировалась величина аберрации высшего порядка, что соответствует обычной постановке задачи исправления объектива в вычислительной оптике. Затем в каждом из вышеперечисленных случаев для различных пространственных частот была найдена зависимость передачи контраста в плоскости наилучшей установки от формы коррекции, определяемой отношением коэффициентов аберрационных членов третьего и пятого порядков $\beta_{46} = w_{40}/w_{60}$. При этом наилучшей считалась та плоскость установки, в которой максимальна передача контраста для выбранной пространственной частоты s. Этот критерий практически не отличается от возможного другого, когда наилучшей считается плоскость, для которой максимально среднее значение множителя передачи контраста в широкой полосе частот от 0 до s. Для различных соотношений аберрационных членов (β_{46}) приведена зависимость положения плоскости наилучшей установки, определяемого величиной $\beta_{26} = w_{20}/w_{60}$, от пространственной частоты s. Промежуточные значения могут быть легко и точно вычислены с помощью линейной интерполяции. Всюду, где это было возможно, результаты, представленные в графическом виде, дополнены простыми формулами.

Таким образом, полученные результаты, являющиеся итогом вычисления на ЭЦВМ с точностью до —0.003 около 4000 интегралов ЧКХ, позволяют в большинстве встречающихся на практике случаев аксиально-симметричной аберрации определить контраст изображения косинусоидальных решеток различных частот и на основании этого найти оптимальную форму коррекции объектива, а также выбрать плоскость наилучшей установки. Если волновая аберрация пятого порядка (w_{60}) превосходит 5—6 длин волн, наилучшая форма коррекции и положение плоскости наилучшей установки могут уже весьма существенно отличаться от того, что предсказывают известные приближения малых аберраций и малых падений контраста, причем такие отступления имеют место на уровне достаточно больших значений ЧКХ — до 0.65. В этом отношении особый интерес представляет область переисправления аберрации ($\beta_{46} > -1.5$). Именно в этой области возникают вторичные максимумы передачи контраста, которые с ростом аберрации и частоты — при определенном их соотношении — становятся главными.

Глава III содержит также разложения модуля и аргумента интеграла ЧКХ в области малых пространственных частот:

$$|D(s)| \approx 1 - \frac{2}{\pi}s - A_2s^2 + \left(\frac{1}{12\pi} - A_3\right)s^3 - A_4s^4,$$

$$\arg D(s) \approx a_1s + a_2s^2 + a_3s^3.$$

Коэффициенты A_2, A_3, A_4, а также a_1, a_2, a_3, определяющие влияние аберраций, выражаются с помощью некоторых усредняющих процессов —

$$A_2 = \frac{k^2}{2}\overline{(W_x - \overline{W}_x)^2},$$

$$A_3 = -\frac{k^2}{\pi}\overline{\overline{(W_x - \overline{W}_x)^2}},$$

$$A_4 = k^2\left[\frac{1}{6}\overline{(W_x - \overline{W}_x)W_{xxx}} + \frac{1}{8}\overline{W_{xx}^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{\pi^2}\left(\overline{\overline{W}_x} - \overline{W}_x\right)^2\right] - \frac{k^4}{24}\overline{(W_x - \overline{W}_x)^4};$$

$$a_1 = k\overline{W}_x,$$

$$a_2 = -\frac{2k}{\pi}\left(\overline{\overline{W}_x} - \overline{W}_x\right),$$

$$a_3 = k\left[\frac{1}{6}\overline{W}_{xxx} - \frac{4}{\pi^2}\left(\overline{\overline{W}_x} - \overline{W}_x\right)\right] - \frac{k^3}{6}\overline{(W_x - \overline{W}_x)^3},$$

где W_x, W_{xx}, W_{xxx} — первая, вторая и третья частные производные от волновой аберрации $W(x, y)$ по переменной x, ось которой перпендикулярна линиям косинусоидальной структуры; одна горизонтальная черта означает усреднение по всему зрачку:

$$\overline{f}=\frac{1}{A}\iint_A f(x, y)\,dx\,dy,$$

а две горизонтальные черты — усреднение по контуру зрачка:

$$\overline{\overline{f}}=\frac{1}{2L_y}\int_{\text{по контуру } A} f(x, y)\,|dy|,$$

здесь L_y — длина проекции контура зрачка на направление, параллельное линиям косинусоидальной структуры.

Первые два, зависящих от аберраций члена разложения модуля ЧКХ использованы для получения допусков, а также условий оптимальной балансировки аберрационных членов в следующих случаях:

- дефокусировка,
- астигматизм,
- астигматизм и кривизна Петцваля,
- кома третьего порядка,
- кома третьего и пятого порядков,
- сферическая аберрация третьего порядка и дефокусировка,
- сферическая аберрация третьего и пятого порядка вместе с дефокусировкой.

Критерием допуска служит равенство

$$|D(s)|=0.8D_0(s),$$

где $D_0(s)$ — ЧКХ безаберрационной и совершенно сфокусированной оптической системы. В случае несимметричных аберраций типа комы с помощью разложения аргумента ЧКХ найдены величины пространственного фазового сдвига, соответствующие допустимым значениям аберрации.

Формулы допусков имеют вид

$$|w_{m,n}|=\left(\frac{k}{s}+l\right)\cdot\lambda,$$

а условия оптимальной балансировки аберрационных членов выражаются равенствами

$$\beta=\frac{w_{m',n'}}{w_{m,n}}=p+qs,$$

где $w_{m,n}$, $w_{m',n'}$ — коэффициенты волновой аберрации, а постоянные k, l и p, q зависят от вида аберрации. В области малых частот влияние на ЧКХ симметричных аберраций, типа сферической, и несимметричных, типа комы, разделяется в том смысле, что падение контраста, обусловленное наличием, например, сферической аберрации, нельзя скомпенсировать, вводя кому, и наоборот. Поэтому та и другая группы аберраций могут рассматриваться отдельно. Выражения для допусков, а также условия наилучшей балансировки аберраций, найденные в данной части диссертации, уточняют и дополняют результаты, известные в литературе, но полученные из других соображений. Область их применения ограничивается частотами до 0.1 предельно разрешаемой оптическим прибором с констрастом 0 частоты $R_{\text{пред}}$ $(s<0.2)$.

Для удобства использования полученных результатов на практике приведены соотношения, связывающие параметры волнового фронта с величинами, имеющими простую геометрическую интерпретацию и хорошо знакомыми оптикам-вычислителям.

И наконец, в третьей главе предлагается приближенный метод быстрой оценки ЧКХ в случае малых частот по размерам геометрического пятна рассеяния. В основе метода лежит аналогия между интегралом ЧКХ, а также интегралом, с помощью которого вычисляется амплитуда дифрагированного поля в центре почти сферической волны и для оценки которого может быть использовано правило Рэлея. Идея этого метода принадлежит Д. Ю. Гальперну.

Оценивается отношение множителя передачи контраста в изображении косинусоидальной решетки частоты R линий/*мм* к той же величине, характеризующей безаберрационную и совершенно сфокусированную систему. Если это отношение обозначить через $M(R)$, то предлагаемое для его оценки приближенное выражение имеет вид

$$M(R)\approx\frac{\sin\pi R\,\Delta\xi}{\pi R\,\Delta\xi},$$

где $\Delta\xi$ — размер пятна рассеяния в направлении, перпендикулярном линиям решетки, причем это пятно обусловлено аберрациями только тех лучей, которые проходят внутри общей части областей зрачка, смещенных друг относительно друга на величину $h\frac{R}{R_{\text{пред}}}$, h — диаметр зрачка. Смещение производится в направлении, перпендикулярном линиям решетки, таким образом, что указанная выше общая часть оказывается равноудаленной от диаметрально противоположных краев зрачка.

В случае дефокусировки, а также зейделевых астигматизма и комы метод применим во всей области разрешаемых частот от 0 до $R_{\text{пред}}$. ЧКХ недооценивается и погрешность тем больше, чем меньше $M(R)$. При $M(R) \sim 0.6$ погрешность достигает 10—15% оцениваемой величины. Получены простые и достаточно точные аналитические выражения допустимых $(M(R) > 0{,}8)$ величин дефокусировки, астигматизма и комы.

Метод дает сильно заниженные результаты тогда, когда пятно рассеяния состоит из ядра, в котором плотность лучей велика, и ореола из небольшого количества сильно рассеянных лучей.

В последней четвертой главе рассмотрены возможности использования ЧКХ в виде критерия качества оптических систем при их автоматической коррекции. Одна из таких возможностей описана в литературе и основывается на приближенном представлении ЧКХ в случае небольших падений контраста. Однако и оптимальная форма коррекции и выбор плоскости наилучшей установки при сравнительно небольших величинах аберрации могут существенно отличаться от того, что требует приближение малых падений контраста. Отступления наиболее значительны для средних частот. Таким образом, во всем диапазоне разрешаемых частот данный метод оптимизации приемлем лишь для тех систем, волновая аберрация которых не превосходит приблизительно половины длины волны. Но более подходящим, чем ЧКХ, критерием качества таких систем является характеристическая яркость Штреля, на основе которой может быть построена менее сложная процедура оптимизации. Что же касается области малых частот, где приближение небольших падений контраста сохраняет силу в очень широких пределах изменения величины аберрации и, следовательно, критерий Штреля неприменим, то здесь в основу более простой процедуры оптимизации могут лечь результаты, полученные в приближении малых частот (глава III).

В этом случае возможность использования ЧКХ в виде критерия качества при автоматической коррекции оптических систем возникает в результате выделения влияния края зрачка на передачу контраста. Это позволяет управлять низкочастотной частью ЧКХ с помощью варьирования веса лучей, проходящих через краевые зоны зрачка, не изменяя обычной процедуры оптимизации. Для того, чтобы минимизация квадратичного относительно аберраций функционала (или оценочной функции) имела смысл повышения передачи контраста на той или иной малой пространственной частоте s необходимо выполнение следующих условий: 1) в оценочную функцию должны входить проекции поперечных аберраций на направление, перпендикулярное линиям косинусоидальной решетки; 2) началом отсчета этих проекций служит прямая, проходящая через центр тяжести изображения параллельно линиям решетки; 3) отношение веса краевых лучей к весу всех остальных лучей должно быть равно для круглого зрачка

$$1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N}{M}\, s,$$

где N — общее число лучей пучка, а M — число тех из них, которые проходят через краевую зону зрачка; 4) на протяжении всего процесса оптимизации значение оценочной функции должно оставаться положительным. Лучи, участвующие в процессе автоматической коррекции, выбираются таким образом, чтобы координаты их пересечения со сферой сравнения пространства объектов образовывали прямоугольную сетку со сторонами, параллельными и перпендикулярными линиям рассматриваемой косинусоидальной решетки. При наличии виньетирования край зрачка может быть достаточно хорошо описан уравнением эллипса. В этом случае задача сводится к круглому зрачку изменением масштаба зрачковых координат, что приводит также и к соответствующему изменению значения приведенной пространственной частоты s.

В заключение отметим, что полученные в диссертации результаты могут найти прямое применение при проектировании и расчете телевизионных и фотографических систем, а также при окончательной оценке их качества.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложено видоизменение метода (Г. Г. Гопкинса) вычисления частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), позволяющее автоматически поддерживать заданную точность независимо от величины аберрации.

2. С помощью этого видоизмененного метода исследовано влияние на ЧКХ сферической аберрации третьего и пятого порядка вместе с дефокусировкой. В результате найдены условия оптимальной коррекции и фокусировки, распространяющиеся на область, которая не поддается аналитическим исследованиям.

3. Уточнен случай малых частот. Получены учитывающие дифракцию выражения для первых трех зависящих от аберраций членов разложений модуля и аргумента интеграла ЧКХ в ряды по степеням пространственной частоты.

4. В области малых частот ЧКХ может быть представлена в виде суммы двух функций: характеристики, построенной в приближении геометрической оптики, и дифракционной добавки. Если главный член первой функции пропорционален второму моменту полного геометрического изображения точечного источника и отрицателен, то первый, зависящий от аберраций, дифракционный член пропорционален второму моменту этого изображения, обусловленному лучами, проходящими только через край зрачка, и положителен.

5. Оба указанных члена разложения модуля ЧКХ использованы для определения допустимых значений аберраций третьего и пятого порядка, условий оптимальной балансировки их членов и выбора плоскости наилучшей установки.

6. Развит предложенный Д. Ю. Гальперном метод приближенной оценки ЧКХ в области малых пространственных частот, в основе которого лежит аналогия с критерием Рэлея. Получено простое выражение для оценки ЧКХ по размерам геометрического пятна рассеяния.

7. В случае простейших аберраций — дефокусировки, астигматизма и комы третьего порядка — такая оценка остается в силе во всей области разрешаемых частот.

8. Указана возможность применения ЧКХ в виде критерия качества оптических систем при их автоматической коррекции. Управление наиболее важной низкочастотной частью характеристики может осуществляться без изменения обычной процедуры оптимизации с помощью варьирования веса лучей, проходящих через краевую зону зрачка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *А. В. Ленский.* О вычислении частотно-контрастной характеристики по методу Гопкинса. Оптика и спектроскопия, 23, 1967, 346.

2. *А. В. Ленский.* Частотно-контрастная характеристика оптических систем, обладающих сферической аберрацией третьего и пятого порядков. Оптика и спектроскопия, 25, 1968, 129.

3. *А. В. Ленский.* Численные значения частотно-контрастной характеристики оптических систем со сферической аберрацией третьего и пятого порядков. Оптико-механическая промышленность, 1968, № 7, 27.

4. *А. В. Ленский.* Частотно-контрастная характеристика в области малых пространственных частот, как критерий качества оптических систем при их автоматической коррекции. Оптика и спектроскопия, 24, 1968, 442.

5. *А. В. Ленский.* К вопросу оценки частотно-контранстной характеристики на основе аналогии с критерием Рэлея. Оптико-механическая промышленность, 1968, № 4, 15.