

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.7.067.285

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕРХШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ МИНИВИДЕОКАМЕР С ПЗС-МАТРИЦЕЙ

© 2005 г. Г. Ф. Беляков*, А. А. Багдасаров*, канд. техн. наук; О. В. Багдасарова**, канд. техн. наук;
Т. А. Кузьмина*, канд. техн. наук

* ВНИИ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург

Предложен аналитический метод исследования и расчета светораспределения в дисторзирующих сверхширокоугольных объективах различной конструкции, предназначенных для работы с видеокамерами на базе ПЗС-матриц малого формата. Приведен пример расчета светораспределения в сверхширокоугольном объективе для работы с ПЗС-матрицей формата 1/3".

Коды OCIS: 120.4570.220.3620.

Поступила в редакцию 02.09.2004.

1. Введение

На этапе разработки схем оптики дисторзирующих объективов прогноз светораспределения затруднен из-за разного влияния на светораспределение конструктивных решений, например, головной части объектива. Известные законы построения изображения в таких объективах могут выполняться с некоторой погрешностью, что влияет, как будет показано далее, на светораспределение.

В настоящей работе исследовано влияние этих факторов на распределение освещенности в плоскости изображения дисторзирующих объективов, применяемых для работы, например, с ПЗС-матрицами, и предложен способ расчета светораспределения с уточнением известных законов построения изображения.

Меру изменения освещенности по полю изображения объективов любого типа оценивают функцией светораспределения $\Phi(\omega)$, где аргументом является угловое поле ω . Она определяется как отношение освещенности $E(\omega)$ полевых точек к освещенности E_0 осевой точки изображения:

$$\Phi(\omega) = E(\omega)/E_0. \quad (1)$$

Напомним составляющие $E(\omega)$. Для дисторзирующих объективов, к которым можно отнести сверхширокоугольные (или особоширокоугольные с полями $2\omega > 135^\circ$ [1]) объективы, Слюсаревым предложена [2] следующая формула:

$$E(\omega) = BS_p \cos^4 \omega l'_0 dl'_0 / f'^2 l' dl', \quad (2)$$

где B – яркость источника, S_p – площадь входного зрачка, соответствующая площади светового пятна в плоскости апертурной диафрагмы для полевого угла ω ; f – фокусное расстояние объектива, $l'_0 = -f' \operatorname{tg} \omega$, dl'_0 – дифференциал функции l'_0 по аргументу ω ; l' – значение функции построения изображения и dl' – дифференциал этой функции, связанные с изменением дисторсии по полю.

Расчет функции светораспределения по предложению Волосова [3] можно выполнить, используя соотношение

$$\Phi(\omega') = [(\operatorname{tg} U'_{+m} - \operatorname{tg} U'_{-m}) \operatorname{tg} \epsilon' / 2 \operatorname{tg}^2 U'_0] \cos^3 \omega', \quad (3)$$

где U'_{+m} и U'_{-m} – углы с оптической осью крайних лучей по зрачку меридионального пучка, ϵ' – угол крайнего луча в главном сагиттальном сечении, U'_0 – апертурный угол осевого пучка, ω' – угол с оптической осью на выходе главного луча, проходящего через центр диафрагмы. Все величины являются выходными параметрами объектива. Анализ показывает, что функция $\Phi(\omega')$ светораспределения будет зависеть только от виньетирования, если предусмотреть в пространстве изображения телецентрический ход главных лучей, когда $\cos \omega' = 1$. В дальнейшем будем применять формулу, предложенную в редакции Русинова [1],

$$\Phi(\omega) = F(\omega) y'_0 dy'_0 \cos^4 \omega / y' dy'. \quad (4)$$

Выходные параметры $y'_0 dy'_0$, y' и dy' аналогичны параметрам формулы (2). $F(\omega)$ — назовем функцией полезного заполнения зрачка (ФПЗ). Она представляет функцию изменения площади входного зрачка по полю в зависимости от геометрического и абберационного виньетирования световых пучков. Соотношения (2)–(4) обычно применяют на практике, когда оптическая система объектива рассчитана и имеется возможность определения его выходных параметров. Многие численные методы расчета распределения освещенности, основанные на автоматизированном расчете и анализе концентрации больших массивов лучей, достигающих плоскости изображения, например приведенные в [4], базируются на использовании также выходных параметров оптических систем.

2. Выбор направления и реализации исследования

Изложим аналитический метод исследования и расчета функции светораспределения в сверхширокоугольных объективах, предназначенных для минивидеокамер на базе ПЗС-матриц формата 1/3". В этом случае можно применять объективы с фокусным расстоянием порядка 2–3 мм при угловых полях $2\omega \geq 140^\circ$. Рассмотрим способы определения вида функциональных зависимостей построения изображения в дисторзирующих объективах, когда известны их конструктивные параметры. Приведем их точностные характеристики для некоторых конкретных конструкций. Определим возможность прогноза композиции головной части объективов, обеспечивающей наибольшее приближение к известным функциональным зависимостям при выбранном угловом поле. Изложим способ расчета светораспределения при неизвестных законах построения изображения объективом, когда конструктивные параметры известны. Представим соотношения, позволяющие с некоторой погрешностью рассчитать светораспределение по таким параметрам, как угловое поле на входе и фокусное расстояние объективов.

Для реализации исследования выразим функцию светораспределения $\Phi(\omega)$ (4) через входные параметры. В качестве входных параметров наметим значения углового поля ω и фокусного расстояния f' объективов. Исследуем в направлении поставленной задачи девять оптических систем сверхширокоугольных объективов, рассчитанных для работы с ПЗС-матрицами формата 1/3". Это позволит иллюстрировать направление исследования.

В задачу исследования входит определение закона построения функций изображения $y' = f(\omega)$, коэффициентов k_ω ближайшего представления этих функций, необходимых для расчета с невысокой точностью светораспределения по входным параметрам

намечаемого к разработке объектива, а также определение значений ФПЗ в исследуемых точках поля и расчет светораспределения для 9 моделей наиболее точным способом. По результатам исследования выполним ориентировочный прогноз светораспределения по одной из выбранных схем объективов до определения его конструктивных параметров.

2.1. Представление функции $\Phi(\omega)$ светораспределения через входные параметры объектива ω и f'

Известно [5, 6], что размер изображения y' дисторзирующих объективов может определяться функциями вида $y' = k\omega$, $y' = f' \sin \omega$ или $y' = 2f' \sin(\omega/2)$, где ω — угол на входе, k — коэффициент пропорциональности для линейного закона построения изображения. В зависимости от вида функции построения изображения можно ориентироваться на получение определенной функции светораспределения: $\Phi(\omega) = F(\omega)$ — для синусного закона, когда $y' = f' \sin \omega$ и светораспределение пропорционально ФПЗ [1], или $\Phi(\omega) = F(\omega) \cos \omega$, когда $y' = 2f' \sin(\omega/2)$. При коррекции аббераций объективов законы образования изображений могут обеспечиваться отслеживанием отрицательной дисторсии $\Delta y'$ по полю, определяемой следующими соотношениями:

$$\Delta y' = -k\omega + f' \operatorname{tg} \omega, \quad (5)$$

для синусного закона

$$\Delta y' = (-\sin \omega + \operatorname{tg} \omega) f', \quad (6)$$

для закона, пропорционального $\sin(\omega/2)$,

$$\Delta y' = (-2\sin(\omega/2) + \operatorname{tg} \omega) f', \quad (7)$$

где $-90^\circ < \omega < 0^\circ$.

При расчете сверхширокоугольных объективов прежде всего форсируется угловое поле, относительное отверстие и качество изображения при выбранном фокусном расстоянии объектива. Например, для работы с ПЗС-матрицами формата 1/3" приходится добиваться размеров пятна рассеяния на уровне величины 2–3 пикселей. Определенные ограничения вносят требования к габаритным размерам, к технологии изготовления оптики и т. д. В этой связи часто не удается получить желаемый ход дисторсии с достаточной точностью по соотношениям (5)–(7). В результате имеет место отступление от указанных выше законов построения изображения. Как в этом случае определить функцию светораспределения $\Phi(\omega)$ с перспективой расчета ее по входным параметрам для прогноза светораспределения? Прежде всего надо установить вид функции построения изображения $y' = f(\omega)$ и ее дифференциал.

2.2. Определение функции $y' = f(\omega)$ построения изображения в реальных схемах оптики объективов

Можно наметить несколько способов определения $y' = f'(\omega)$.

Способ подбора. Угловое поле от 0° , например, до $89,96^\circ$ разбивается на зоны числом N с шагом $\Delta\omega$. Для каждой зоны выполняется расчет хода главного луча, проходящего через центр диафрагмы, и в плоскости изображения определяются N координат y' . Для этих же точек поля последовательно рассчитываются значения функций $y'_i = k\omega_i$, $y'_i = f'\sin\omega_i$, $y'_i = 2f'\sin(\omega_i/2)$. Наименьшая разность $\Delta y'$ между значениями y' , рассчитанными по ходу главных лучей, и значениями y' подбираемой функции дает право закрепить соответствующий закон построения изображения за этой функцией. Недостатком способа является отсутствие гарантии того, что подобранная функция наиболее близким образом описывает реальную функцию построения изображения.

Следующий способ позволяет представить ближайшую функцию с погрешностью от 10 до 0,5%, и при дополнительном уточнении значения функции, поясняемом ниже, точность расчета y' может составить от 1,8 до 0,06%. По этому способу осуществляется аналогичная разбивка поля на зоны с определением y' по ходу главных лучей.

Здесь вводится разностная функция $f''(k)$, которая, например, при приближении к линейной функции имеет вид $f''(k) = \sum_{i=1}^N (y'_i - k\omega_i)^2$, где y'_i — значение по расчету главных лучей, а $k\omega_i$ — коэффициент ближайшего представления линейной функции. Взяв производную от функции $f''(k)$ по аргументу $k\omega_i$ и приравняв ее к 0, получаем соотношение, позволяющее определить коэффициент $k\omega_i$:

$$k\omega_i = \sum_{i=1}^N y'_i \omega_i / \sum_{i=1}^N \omega_i^2. \quad (8)$$

Закон построения для ближайшей линейной зависимости определится при этом функцией вида

$$y'(\omega_i) = k\omega_i. \quad (9)$$

Таким же способом может быть определен коэффициент ближайшего представления $k_{\sin\omega}$ для синусных зависимостей

$$k_{\sin\omega} = \sum_{i=1}^N y'_i \sin\omega_i t / \sum_{i=1}^N \sin^2\omega_i t. \quad (10)$$

В наших исследованиях величина t определялась интервалом $0,5 \leq t \leq 1,08$ (см. табл. 2, столбец 3). Закон построения изображения определяется функцией

$$y'(\sin\omega_i) = k_{\sin\omega} \sin\omega_i t. \quad (11)$$

Определив значения y' по (9) и (11) при значениях $t = 0,5$ и 1 , можно выбрать соотношение, наилучшим образом отвечающее закону построения в исследуемом объективе. В работе Тарабукина [6] было отмечено, что схемы оптики объективов, головные части которых состоят из двух отрицательных линз, могут строить изображение по закону, близкому к синусному. Это подтверждается и нашими исследованиями. При полях, превышающих 180° , законы, близкие к $\sin(\omega/2)$, могут иметь место в объективах с трехлинзовой головной частью отрицательной силы. К таким выводам можно прийти, анализируя табл. 1 (столбцы 2, 11–13). Рассмотренный способ позволяет установить ближайший закон построения изображения. Однако приведенная в таблице погрешность расчета y' может считаться значительной. Эта погрешность приводит к соответствующей погрешности расчета светораспределения.

После определения вида функции можно рекомендовать следующий наиболее точный способ расчета y' , позволяющий получить аналитические выражения для определения светораспределения с наименьшей погрешностью. Согласно выполненным исследованиям он позволил получить максимальную погрешность в расчете y' от 0,001 (модель GPR81) до 0,00006 мм (модель GRIM). Суть его в следующем. Используя ранее рассчитанные по ходу главных лучей значения y' , составляется N -узловая табличная функция, которая определяется затем в аналитическом виде расчетом полинома степени m ($m = 5$ или 7), по аргументам ω_i или $\sin\omega_i t$ путем аппроксимации ее, например, по методу наименьших квадратов. Если ранее установлено, что закон ближе к линейному, то рассчитывается полином вида

$$y'(\omega_i) = A_1\omega_i + A_2\omega_i^2 + A_3\omega_i^3 + \dots + A_m\omega_i^m = \sum_{j=1}^m A_j\omega_i^j; \quad (12)$$

для синусных законов полином имеет вид

$$y'(\sin\omega_i) = A_1 \sin\omega_i t + A_2 \sin^2\omega_i t + \dots + A_m \sin^m\omega_i t = \sum_{j=1}^m A_j \sin^j\omega_i t. \quad (13)$$

Значение m выбирается таким, чтобы $A_0 \leq 10^{-3}$. Расчет полиномов можно выполнить по соответствующим программам, например [7].

2.3. Определение дифференциалов функций построения изображения

Для расчета светораспределения можно пользоваться приближенными формулами вычисления дифференциалов функций [8]. Если $\Delta\omega$ — небольшое приращение углового поля ($\Delta\omega = 0,005^\circ - 0,01^\circ$)

и $\omega_{i+1} = \omega_i + \Delta\omega$, то для функции y'_0 параксиального изображения линейного поля

$$dy'_0 \equiv f'(\operatorname{tg}\omega_{i+1} - \operatorname{tg}\omega_i), \quad (14)$$

для функции вида (9)

$$d(y'(\omega_i)) \equiv k_{\omega}(\omega_{i+1} - \omega_i), \quad (15)$$

для функции вида (11)

$$d(y'(\sin\omega_i)) \equiv k_{\sin\omega}(\sin\omega_{i+1}t - \sin\omega_it). \quad (16)$$

Для расчета более точных значений функции светораспределения $\Phi(\omega)$ с применением функции вида (12) или (13) их дифференциалы могут быть выражены так:

$$d(y'(\omega_i)) \equiv \sum_{j=1}^m A_j (\omega_{i+1}^j - \omega_i^j), \quad (17)$$

$$d(y'(\sin\omega_i)) \equiv \sum_{j=1}^m A_j (\sin^j \omega_{i+1}t - \sin^j \omega_it), \quad (18)$$

где m – степень полинома.

2.4. Определение функций светораспределения $\Phi(\omega)$, выраженных через входные параметры ω_i и f'

Для приближенного расчета значений функции светораспределения $\Phi(\omega)$ могут применяться следующие соотношения:

для линейных функций по аргументу ω

$$\Phi(\omega_i) = F(\omega_i) f'^2 \operatorname{tg}\omega_i (\operatorname{tg}\omega_{i+1} - \operatorname{tg}\omega_i) \times \\ \times \cos^4 \omega_i / k_{\omega}^2 (\omega_{i+1}^{\omega} - \omega_i^{\omega}), \quad (19)$$

для синусных зависимостей по аргументу $\sin\omega_it$

$$\Phi(\omega_i) = F(\omega_i) f'^2 \operatorname{tg}\omega_i (\operatorname{tg}\omega_{i+1} - \operatorname{tg}\omega_i) \times \\ \times \cos^4 \omega_i / k_{\sin\omega}^2 \sin\omega_it (\sin\omega_{i+1}t - \sin\omega_it). \quad (20)$$

Формулы получены после подстановки составляющих (9), (11), (14–16) в формулу (4). После определения конструктивных параметров объектива и появления возможности “опознания” функции для расчета коэффициентов полиномов A_j можно рассчитать светораспределение по следующим формулам:

при линейном законе построения изображения

$$\Phi(\omega_i) = F(\omega_i) f'^2 \operatorname{tg}\omega_i (\operatorname{tg}\omega_{i+1} - \operatorname{tg}\omega_i) \times \\ \times \cos^4 \omega_i / \sum_{j=1}^m A_j \omega_i^j \sum_{j=1}^m A_j (\omega_{i+1}^j - \omega_i^j), \quad (21)$$

для синусных законов

$$\Phi(\sin\omega) = F(\omega_i) f'^2 \operatorname{tg}\omega_i \times \\ \times (\operatorname{tg}\omega_{i+1} - \operatorname{tg}\omega_i) / \sum_{j=1}^m A_j \sin^j \omega_i \times \\ \times \sum_{j=1}^m A_j (\sin^j \omega_{i+1}t - \sin^j \omega_it). \quad (22)$$

Формулы получены после подстановки составляющих (12), (13), (14), (17), (18) в формулу (4).

2.5. Определение функций полезного заполнения зрачка $F(\omega_i)$ входа объектива

Функцию $F(\omega_i)$ можно определить соотношением

$$F(\omega_i) = S(\omega_i) / S_0, \quad (23)$$

где $S(\omega_i)$ – площадь входного зрачка для пучка света с наклоном ω_i главного луча к оптической оси, S_0 – площадь зрачка осевого пучка. Площадь $S(\omega_i)$ можно принять за площадь эллипса с большой осью по зрачку входа в меридиональном сечении и с малой осью в сагиттальном сечении. В профессиональных программах для расчета aberrаций может предусматриваться автоматическое вычисление коэффициентов полезного заполнения зрачка в каждом сечении при назначении световых диаметров на поверхностях линз с учетом виньетирования. Если $(k_{+m})_i$ – коэффициент заполнения для плюсового края зрачка, $(k_{-m})_i$ – для минусового, а $(k_s)_i$ – для сагиттального сечения, то значение функции $F(\omega_i)$ может быть рассчитано по формуле

$$F(\omega_i) = [(k_{+m})_i + (k_{-m})_i] (k_s)_i / 2. \quad (24)$$

3. Исследование светораспределения в сверхширокоугольных объективах, предназначенных для работы с ПЗС-матрицами 1/3"

Исследования проводились для 9 моделей различной конструкции с числом линз от 6 до 9, с угловыми полями 2ω от 140° до 218° и фокусными расстояниями от 3,36 до 1,96 мм. Выполнена оптимальная коррекция aberrаций. Разрешающая способность 8 объективов (кроме GPR79) характеризуется уровнем 50 лин/мм при коэффициенте передачи контраста не ниже 0,25 по расчету частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Основная длина волны 750 нм. Спектральный диапазон расчета ЧКХ 435–900 нм. Коррекция дисторсии с целью получения известных законов построения изображения не выполнялась. Технические характеристики приведены в табл. 1.

3.1. Анализ функций построения изображения

На первом этапе поиска вида функциональных зависимостей построения изображения для всех 9 объективов выполнялся расчет коэффициентов k_{ω} по (8) и $k_{\sin\omega}$ по (10) при $t = 1$ и 0,5. Для первых четырех моделей табл. 1 расчеты выполнены в пределах угла поля $\omega = 71,968^\circ$ с шагом $2,249^\circ$ и для ос-

Таблица 2. Функциональные и светотехнические характеристики исследуемых сверхширокоугольных объективов

Наименование модели	Характеристика уточненной синусной зависимости $y' = k_{\sin} \sin \omega$			Значение функции полезного заполнения зрачка $F(\omega_i)$										Значение функции светораспределения $\Phi(\omega_i)$						
				$k_{\sin}$	ω	$\Delta y', \%$	13,5°	25°	36°	47°	58,5°	70,4°	83°	89,96°	13,5°	25°	36°	47°	58,5°	70,4°
GPR79	3,2597	0,96ω	-0,08...+0,06	0,995	1,0	1,0	1,01	0,955	0,765	—	—	—	0,995	0,993	0,977	0,956	0,890	0,680	—	—
GPR81	3,0762	1,08ω	+1,1...-0,45	0,987	0,964	0,929	0,892	0,851	0,819	—	—	—	0,998	1,006	1,012	1,022	1,017	1,075	—	—
G237F	3,4720	0,87ω	-0,68...+0,38	1,0	1,02	1,04	1,07	1,13	1,17	—	—	—	1,0	0,957	0,957	0,935	0,913	0,799	—	—
GPRB90	3,2579	1,01ω	+1,5...-0,26	1,0	1,0	1,01	0,995	0,915	0,742	—	—	—	1,0	1,01	1,04	1,03	0,970	0,801	—	—
GMN3	3,0996	0,85ω	-1,2...+0,49	1,0	0,999	1,024	1,092	1,119	1,41	1,767	29,74	0,947	0,914	0,884	0,863	0,835	0,822	0,622	0,105	0,071
M15	3,3313	0,71ω	+0,13...-0,27	1,01	1,09	1,102	1,166	1,311	1,404	1,767	47,6	0,989	1,019	0,954	0,894	0,826	0,636	0,355	0,071	0,120
GRIM	3,9072	0,5ω	+0,26...-1,41	1,02	1,066	1,113	1,231	1,475	2,069	4,633	220,9	0,996	0,975	0,915	0,859	0,791	0,714	0,607	0,120	0,126
B7	3,1230	0,65ω	+1,5...-0,71	1,015	1,071	1,16	1,332	1,54	2,01	3,978	133,1	0,996	1,012	1,023	1,041	0,987	0,828	0,585	0,126	0,190
LIDA4	3,1344	0,65ω	+1,80...-0,44	1,01	1,055	1,148	1,314	1,595	2,013	4,250	179,1	0,999	1,0	1,021	1,037	1,020	0,872	0,689	0,190	0,190

тальных моделей в пределах угла поля $\omega = 89,96^\circ$. Результаты представлены в столбцах 8–10 таблицы. По формулам (9), а при $t = 0,5$ и 1 по формулам (11) рассчитаны значения y' и определены их погрешности расчета относительно расчетной величины y' для главных лучей. Результаты приведены в столбцах 11–13. Из их анализа можно сделать следующие выводы:

модели GPR79, GPR81, G237F и GPRB90 с двухлинзовой головной частью конструкции и полем на уровне 140° строят изображение по закону, близкому к синусному, так как дают наименьшую погрешность для функции $y' = k'_{\sin \omega} \sin \omega$ (см. столбец 12). Остальные модели с трехлинзовой головной частью и полем более 180° характеризуются зависимостью, близкой к $y' = k_{\sin(\omega/2)} \sin(\omega/2)$ (см. столбец 13). Можно заметить, что эта закономерность сохраняется при различных конструкциях хвостовой части объективов. Исключение составила модель GMN3, для которой при трехлинзовой головной части и поле до 180° получена зависимость, приближающаяся к синусной. Только для модели GRIM функция близка к виду $y' = 2f' \sin(\omega/2)$. Приведенная в табл. 1 погрешность расчета y' (столбцы 12, 13) была существенно уменьшена после уточнения t в выражении (13) и последующего уточнения коэффициентов $k_{\sin \omega}$ по (10). Характеристики уточненных функциональных зависимостей приведены в табл. 2 (столбцы 2–4).

Для ориентировочного прогноза светораспределения по входным параметрам ω и f' на основании выполненного исследования (принимая во внимание данные столбцов 4, 9 и 10 табл. 1 и то важное обстоятельство, что в объективах предварительно не отслеживался какой-либо закон построения изображения специальной коррекцией дисторсии) были использованы усредненные значения найденных коэффициентов ближайшего представления $\bar{k}_{\sin \omega}^{\text{cp}}$ и $\bar{k}_{\sin(\omega/2)}^{\text{cp}}$ этих функций. Если принять $\bar{k}_{\sin \omega} = k_{\sin \omega} f'$ и $\bar{k}_{\sin(\omega/2)} = k_{\sin(\omega/2)} / f'$, то для объективов (на базе 5 рассмотренных объективов) с зависимостью, близкой к синусной, усредненный коэффициент

$$\bar{k}_{\sin \omega}^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^5 \bar{k}_{\sin \omega} / 5 = (3,1698/3,132 + 3,2324/3,359 + 3,1448/3,02 + 3,2796/3,32 + 2,8265/2,62) / 5 = 1,017. \quad (25)$$

Функция построения изображения определялась тогда как

$$y'(\sin \omega) = 1,017 f' \sin \omega. \quad (26)$$

Для зависимости, близкой к $\sin(\omega/2)$, на базе 4 рассмотренных объективов было принято

$$\bar{k}_{\sin(\omega/2)}^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^4 \bar{k}_{\sin(\omega_i/2)} / 4 = (4,4321/2,36 + 3,9072/1,96 + 3,885/2,06 + 4,04/2,08) / 4 = 1,925. \quad (27)$$

Функция построения изображений определялась тогда

$$y'(\sin(\omega/2)) = 1,925 f' \sin(\omega_i/2). \quad (28)$$

3.2. Расчет значений функций полезного заполнения зрачка

Расчеты выполнялись для 6 точек поля от $13,5^\circ$ до $70,4^\circ$ для первых четырех моделей и для 8 точек до $89,96^\circ$ для последующих моделей. Для расчета значений функции $F(\omega_i)$ применена формула (24). Результаты приведены в табл. 2 (столбцы 5–12) и использованы при расчете прогнозируемого светораспределения по схемам, предлагаемым в табл. 1. При расчете $F(\omega_i)$ учтено абберрационное виньетирование, введенное с целью получения необходимого качества изображения на краю поля.

3.3. Численная оценка светораспределения в исследуемых схемах объективов

После уточнения аргументов ω_i для всех синусных зависимостей расчет значений $\Phi(\omega)$ выполнялся по формуле (22) в 6 точках поля для первых четырех моделей и в 8 точках для последующих. При расчете учтены значения функций $F(\omega)$. На основании анализа результатов, приведенных в столбцах 13–20 табл. 2, можно сделать общие выводы.

Приведенные соотношения позволяют выполнять расчеты функции светораспределения с хорошей точностью и степенью достоверности, обусловленной соотношением (4). При этом условии они пригодны для любых дисторзирующих объективов. Объективы с двухлинзовой головной конструкцией и синусной зависимостью построения изображения в диапазоне $(0,87-1,08)\omega$ отличаются плавно изменяющейся характеристикой светораспределения. Для трехлинзовых головных конструкций при аргументах $(0,5-0,71)\omega$ падение величины $\Phi(\omega)$ по полю идет значительно заметнее к краю поля, несмотря на рост значений $F(\omega)$. Дисторзирующие объективы имеют более высокие показатели светораспределения, чем ортоскопические.

3.4. Пример выбора схемы и ориентировочного прогноза светораспределения в плоскости изображения сверхширокоугольного объектива

Исходные данные. Объектив предназначен для работы с ПЗС-матрицей формата $1/3''$. Поле обзора $2\omega \approx 180^\circ$. Относительное отверстие $1/2,3-1/2,1$.

Постановка задачи. Выбрать схему и определить ориентировочные значения фокусного расстояния f' и углового поля объектива: по горизонту $2\omega_s$ при линейном размере его $2y_s = 4,8$ мм и по вертикали $2\omega_m$ при линейном размере в этом направлении $2y'_m = 3,6$ мм. Рассчитать ориентировочные значения функции светораспределения $\Phi(\omega)$ объектива в этих точках поля.

Решение. С учетом поля, относительного отверстия, ориентируясь на данные табл. 1, выберем схему девятилинзовой конструкции с трехлинзовой головной частью. Это позволит ориентироваться на закон построения изображения по аргументу, близкому к $\sin(\omega/2)$ и сделать выбор коэффициентов функции $F(\omega_i)$ из табл. 2. Общая конструкция при оптимальном подборе положения диафрагмы может позволить получить удовлетворительное качество изображения.

1. Воспользуемся соотношением (28) и определим f' , принимая во внимание размер матрицы по диагонали $2y' = 6$ мм и поле объектива $2\omega = 180^\circ$:

$$f' = \frac{y'}{1,925 \sin(90^\circ/2)} = 2,2 \text{ мм.}$$

2. Рассчитаем ориентировочные значения углового поля $2\omega_s$ по горизонту и $2\omega_m$ по вертикали, используя соотношение $\sin(\omega/2) = y'/1,925f'$,

$$\omega_s/2 = \arcsin(2,4/1,925 \times 2,2) = 34,52^\circ \text{ и } 2\omega_s = 138,1^\circ - \text{по горизонту,}$$

$$\omega_m/2 = \arcsin(1,8/1,925 \times 2,2) = 25,15^\circ \text{ и } 2\omega_m = 100,6^\circ - \text{по вертикали.}$$

Отметим, что здесь учитывается влияние дисторсии.

3. Найдем ориентировочные значения функции $F(50,3^\circ)$ и $F(69^\circ)$ путем приближенной интерполяции по данным табл. 2 (3 строки снизу вверх) для девятилинзовой схемы со значением $F(\omega_i)$ в диапазоне $47^\circ-70,4^\circ$, например, для модели GRIM. В результате находим $F(50,3^\circ) = 1,3$ и $F(69^\circ) = 2$.

4. Выполним ориентировочный расчет падения освещенности в найденных точках поля по формуле (20), принимая во внимание, что $k_{\sin\omega} = \bar{k}_{\sin(\omega/2)}^{\text{cp}}$ и $\sin\omega_i f' = \sin(\omega_i/2)$. Примем $\omega_{i+1} = \omega_i + 0,01^\circ$.

Для крайней точки по вертикали ($\omega = 50,3^\circ$)

$$\Phi(50,3^\circ) = \frac{F(50,3^\circ) f'^2 \lg 50,3^\circ (\lg 50,31^\circ - \lg 50,3^\circ) \cos^4 50,3^\circ}{(1,925 f')^2 \sin(50,3^\circ/2) (\sin(50,31^\circ/2) - \sin(50,3^\circ/2))} = 0,897.$$

Для крайней точки по горизонту ($\omega = 69^\circ$) аналогично найдем $\Phi(69^\circ) = 0,774$.

В связи с тем что расчеты $\Phi(\omega)$ проводились по усредненному значению $\bar{k}_{\sin(\omega/2)}^{\text{ср}} = 1,925$, а, например, для модели GRIM $\bar{k}_{\sin(\omega/2)} = 3,9072/1,96 = 1,993$, можно прогнозировать, что эти значения будут не ниже $\Phi(50,3^\circ) = 0,836$ и $\Phi(69^\circ) = 0,722$.

Заключение (по разделу 3)

Проведенные исследования различных типов разработанных объективов, построение изображений в которых происходит по различным функциональным зависимостям, зачастую для сверхширокоугольных систем, переходящих из одного вида в другой при росте поля, дали возможность оперативного решения ряда вопросов инженерного порядка, в частности предварительной экспресс-оценки светораспределения по полю изображения указанных объективов без проведения специальных расчетов, а лишь на основе сравнительно несложных аналитических соотношений и таблиц, полученных при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 380 с.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
3. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 672 с.
4. Тогулев В.П., Пейсахсон И.В. Методы расчета распределения освещенности в пространстве изображения оптической системы // ОМП. 1976. № 1. С. 62.
5. Scheibel J. Alles uber Tisheyc Objective // Moderne Foto-technik. 1971. Bd. 10. S. 546-551.
6. Тарабукин В.В. Расчет особоширокоугольных фотографических систем // ОМП. 1974. № 3. С. 29-32.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. С. 143.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: ФМЛ, 1962. С. 307.