

В. Г. Поспехов, Т. С. Ровенская,
А. В. Крюков

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАСЧЕТА ПАНКРАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА ПОСТОЯННОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ

Рассмотрены принципы построения оптических схем компактных панкратических объективов и выявлены преимущества схем постоянной длины. Представлены оригинальные математические зависимости для расчета взаимного положения групп и плоскостей предмета и изображения двухгрупповой системы переменного увеличения и проведен анализ области решений такой схемы. Рассмотрены вопросы улучшения качества изображения исходной оптической схемы путем оптимизации по программам OPAL и ZEMAX.

E-mail: vychposp@yandex.ru; rovar@yandex.ru
alex_krioukov@mail.ru

Ключевые слова: панкратический объектив, синтез, системы переменного увеличения, оптимизация, модуляционная передаточная функция, гибридная асферическая линза.

Анализ рекламных сообщений, каталогов ведущих производителей цифровой фотоаппаратуры и патентных материалов позволяет констатировать бурное развитие цифровой аппаратуры в настоящее время и прогнозировать дальнейшее расширение областей применения объективов и оптических систем с переменными характеристиками. Это — цифровая фотоаппаратура, видеокамеры, проекторы, мобильные телефоны.

Производителями электронных приемников излучения (ПИ) ведется постоянная работа, направленная на повышение разрешающей способности матриц с диагональю 1/1,7" ... 1/2,5", используемых в цифровых фотокамерах среднего уровня, а также на улучшение характеристик процессоров для обработки изображения и миниатюрных шаговых двигателей.

Особенности конструкций современных матричных ПИ определяют требования к построению оптической схемы объектива. Так, размещение блока микролинз перед чувствительным слоем ПИ требует обеспечения равномерной освещенности матрицы от ее центра к краю. Это реализуется ходом главных лучей наклонных пучков, близким к телецентрическому в пространстве изображений. Размещение в сходящихся пучках лучей перед матрицей оптического фильтра значительной толщины, обрезающего излучение ИК области спектра и выполняющего функции устранения муарового эффекта, предъявляет определенные требования к заднему фокальному отрезку объектива и

вносит вклад в абберационную коррекцию схемы. Другая особенность построения оптических схем панкратических объективов вытекает из более жестких требований к их габаритным размерам. Фотокамеры среднего уровня имеют корпус прямоугольной формы размером 100×60 мм (ширина–высота). Для удобства пользования камера, по возможности, должна быть плоской (толщина 25...30 мм), объектив не должен значительно выступать за пределы этого размера. Препятствием для дальнейшего уменьшения размера камеры по толщине является длина панкратического объектива от первой поверхности до плоскости изображения.

Указанные требования затрудняют применение ряда известных схем и также выдвигают на первое место фактор качества.

В последнее время найдены и продолжают совершенствоваться некоторые пути решения проблемы оптимизации габаритных размеров объективов цифровых фотокамер:

- применение оправы объектива телескопического типа (выдвигающейся);
- разработка устройства выключения из хода лучей одной из групп линз объектива;
- применение вращающегося оптического блока;
- применение оптического блока перископического типа.

Большое распространение получили оптические схемы объективов, позволяющие на их основе конструировать оправы телескопического типа. Однако такая компоновка объектива, при которой расположенная ближе к объекту группа линз является подвижной, страдает недостатком в отношении защиты от влаги и пыли и, кроме того, требует определенного времени для приведения фотоаппарата в рабочее состояние при выдвигании оправы. При этом не всякая схема позволяет сложить ее до размера толщины камеры.

От этих недостатков свободна оптическая схема объектива, длина которой от первой поверхности до плоскости изображения остается постоянной в процессе изменения фокусного расстояния системы. Однако значительная длина такого рода систем как в рабочем, так и в нерабочем состоянии препятствует сокращению толщины камеры, объектив выступает за габаритные размеры камеры и создает неудобства при ее ношении. Техническим решением, которое применила компания Nikon, явилась компоновка объектива в виде вращающегося оптического блока, ориентированного в нерабочем состоянии вдоль высоты камеры, превышающей ширину от 2 до 2,5 раз. В рабочем состоянии оптический блок поворачивается на 90° , при этом оптическая ось его ориентируется вдоль толщины камеры [1].

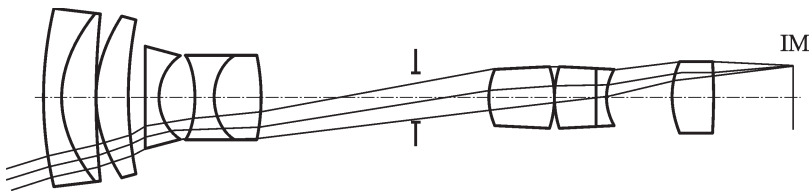


Рис. 1. Оптическая схема панкратического объектива постоянной длины

Оптическая схема такого рода объективов чаще всего представляет собой четырехгрупповую систему, базовым элементом которой является двухгрупповая система переменного увеличения (СПУ), включающая в себя две перемещающиеся группы в целях изменения фокусного расстояния. Известны работы, в которых рассмотрены вопросы выбора соотношения фокусных расстояний некоторых типов двухгрупповых СПУ и построения панкратических объективов на их основе [2–4]. Однако прогресс цифровой фотоаппаратуры возрождает интерес к поиску новых подходов к построению схем панкратических объективов.

В настоящей статье приведены результаты исследований в области расчета одного из типов четырехгрупповых панкратических объективов.

Ряд вариантов построения такого рода систем рассмотрен в работе [5]; схема одного из вариантов объектива приведена на рис. 1.

Система переменного увеличения этого объектива включает в себя вторую группу отрицательной оптической силы (4-я... 6-я линзы) и третью группу положительной оптической силы (7-я... 9-я линзы). Узловым этапом расчета объектива является выбор оптической схемы СПУ и изучение ее свойств, а также нахождение соотношений параметров СПУ — все это позволит преодолеть возможные ограничения в области гауссовой оптики.

Исследование свойств двухгрупповой СПУ. Авторы настоящей работы, изучая свойства СПУ различных типов, выработали подход к выбору оптимальных параметров СПУ. Основные формулы для расчета взаимного положения групп и плоскостей предмета и изображения двухгрупповой СПУ рассматриваемого типа имеют вид:

$$d = 0,5L \pm \sqrt{0,25L^2 - (K + 1)f_2' L - \frac{(1 - \beta)^2}{\beta} K f_2'^2};$$

$$a = \frac{K \frac{1 - \beta}{\beta} f_2'^2 + K d f_2'}{f_2'(K + 1) - d};$$

$$a' = \frac{K(1 - \beta) f_2'^2 - d f_2'}{f_2'(K + 1) - d},$$
(1)

где d — расстояние между группами СПУ; a — расстояние от первой группы до точки предмета A ; a' — расстояние от второй группы до точки изображения A' ; f'_2 — фокусное расстояние второй группы СПУ; L — расстояние между точкой предмета A и точкой изображения A' ; $K = \frac{f'_1}{f'_2}$ — отношение фокусных расстояний первой и второй групп СПУ; β — линейное увеличение СПУ.

Анализируя формулы (1), выявили, что для получения удовлетворительного решения при выборе значений для K , f'_2 , L надо учесть ряд ограничений.

Первый тип ограничений получен из условия $D \geq 0$, где D — подкоренное выражение в формуле для d . Оно приводит к решению квадратного уравнения следующего вида:

$$\beta^2 + \beta \left[\frac{K+1}{K} \cdot \frac{L}{f'_2} - \frac{0,25L^2}{Kf_2^2} - 2 \right] + 1 = 0. \quad (2)$$

Уравнение может иметь два решения (β_1, β_2) , разграничивающих области с $D > 0$, $D < 0$; одно решение $(\beta_1 = \beta_2)$ при $D = 0$ и не имеет решения при $D < 0$, когда СПУ не осуществима.

Подкоренное выражение в формуле (1) для d является функцией основных параметров СПУ: $D = F(\beta, K, L, f'_2)$; функция принимает экстремальное значение при $\beta_{\text{ext}} = 1$. После подстановки значения β_{ext} в уравнение (2) получаем зависимость

$$f'_2 = \frac{L}{4(K+1)}, \quad (3)$$

при которой $d_{\text{ext}} = 0,5L$.

Интервал значений линейного увеличения от β_{max} до β_{min} , а также осуществимый перепад линейных увеличений $M = \beta_{\text{max}}/\beta_{\text{min}}$ можно определить при удовлетворении второго ограничения: $d \geq 0$. Оно приводит к решению квадратного уравнения

$$\beta^2 + \beta \left[\frac{K+1}{K} \cdot \frac{L}{f'_2} - 2 \right] + 1 = 0. \quad (4)$$

Решая уравнение (4), определяют диапазон значений увеличения (β_3, β_4) , за пределами которого в случае применения знака минус перед корнем в выражении (1) для d СПУ осуществимы. В дальнейшем расстояния d между группами СПУ, полученные из выражения (1) в случае знаков плюс и минус перед корнем, обозначим d_+ и d_- соответственно.

Третье ограничение имеет место при равенстве $f'_2(K+1) - d = 0$, которое соответствует вырождению систем такого типа; оно приводит к квадратному уравнению

$$K\beta^2 + \beta[(K+1)^2 - 2K] + K = 0. \quad (5)$$

Решениями уравнения (5) являются корни $\beta_{P1} = -K$, $\beta_{P2} = -1/K$; как правило, при одном из этих значений β_P функции $a = F(\beta)$ и $a' = F_1(\beta)$ терпят разрыв.

Авторами настоящей работы предложено проводить анализ свойств СПУ при условиях нормировки к единичной длине СПУ: $L = 1$. При переходе к реальным значениям параметры изменяются путем умножения на коэффициент масштаба $K_{\text{масш}}$. Область значений параметров СПУ рассматриваемого типа (первая группа – отрицательной силы, вторая группа – положительной силы): $f'_2 > 0$, $K < 0$ при $L > 0$, $\beta > 0$ – занимает четвертую четверть системы координат (f'_2, K) .

На рис. 2 представлена одна из ветвей гиперболы, соответствующей выражению (3), определяющая предпочтительную при нахождении взаимного положения подвижных групп совокупность значений (K, f'_2) . Анализ области решений выполнен для ряда дискретных точек 1, ..., 6, для которых по уравнениям (3)–(5) найдены значения увеличения, определяющие области возможной реализации СПУ рассматриваемого типа; результаты приведены в табл. 1.

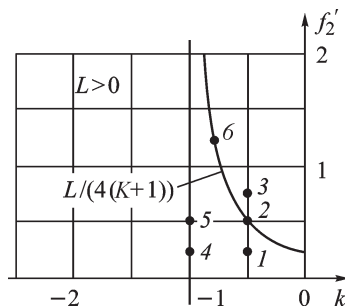


Рис. 2. Области возможной реализации СПУ рассматриваемого типа

Таблица 1

Области решений двухгрупповой СПУ

№ точки (см. рис. 2)	K	f'_2	Значения линейного увеличения β				
			условие $D > 0$		условие $d > 0$		разрыв a, a'
			β_1	β_2	β_3	β_4	
1	-0,5	0,25	-1	-1	0,172	5,828	0,5
2	-0,5	0,5	1	1	0,268	3,732	0,5
3	-0,5	0,75	0,5195	1,125	0,334	3	0,5
4	-1	0,25	-1	-1	1	1	1
5	-1	0,5	Нет решения	Нет решения	1	1	Нет решения
6	-0,793	1,21	1	1	0,631	1,585	0,793

Из рис. 2 видно, что точки 1 и 4 лежат на прямой $f'_2 = \frac{1}{4}L$ (один из корней уравнения (1)). В этом случае отсутствие решения уравнения (1) имеет место при значении $\beta = -1$, которое находится за пределами значений увеличения СПУ исследуемого типа. Системы переменного увеличения d_+ с параметрами точек 1 и 4 могут быть реализованы в большом диапазоне значений β . Однако габаритные размеры этих

СПУ будут значительными ($d_{\min} = 1$ для точки 4 и $d_{\min} = 0,854$ для точки 1). Система переменного увеличения d_- с параметрами точки 4 имеет значения $d < 0$ во всем диапазоне изменения значений β , а функции $a = F(\beta)$ и $a' = F_1(\beta)$ терпят разрыв при $\beta = 1$. Система переменного увеличения d_- с параметрами точки 1 имеет положительные значения d в диапазоне значений $\beta = 0,172 \dots 5,828$ (см. табл. 1), однако при $\beta = \beta_P = 0,5$ функции $a = F(\beta)$ и $a' = F_1(\beta)$ терпят разрыв, что существенно сокращает диапазон значений линейного увеличения, в пределах которого возможна реализация СПУ.

При численных значениях параметров точки 3 СПУ d_+ и d_- не могут быть реализованы в диапазоне значений увеличения $\beta = 0,512 \dots 1,92$ (условие $D > 0$). В диапазоне увеличений $\beta = 0,334 \dots 3,000$ СПУ d_- имеет положительные значения d , однако при $\beta = \beta_P = 0,5$ функции $a = F(\beta)$ и $a' = F_1(\beta)$ терпят разрыв. Всех неблагоприятных ограничений удастся избежать при выборе значений параметров СПУ, лежащих на гиперболе (точки 2 и 6), при этом СПУ d_+ имеет оптимальные габаритные размеры ($d_{\min} = 0,5$ для точек 2 и 6).

Для синтеза панкратического объектива были выбраны следующие параметры СПУ: $K = -0,793$; $f'_2 = 1,208$; $\beta = 0,3 \dots 0,9$; $L = 1$; для перехода от нормированных значений параметров объектива к реальным был определен масштабный коэффициент $K_{\text{масш}} = 14,2$ мм.

Результаты исследований в области абберационного расчета панкратического объектива. Переход от схемы [5] к оптической схеме объектива с использованием оптических стекол российского каталога вызывает изменение исходной абберационной коррекции и требует улучшения качества изображения модифицированного варианта. Решение данной задачи выполнено с использованием автоматизированной коррекции объектива с применением ППП OPAL [6]. Оптическая схема одного из вариантов модифицированного объектива приведена на рис. 3. Объектив имеет следующие оптические характеристики: $f' = 7,6 \dots 21,54$ мм, $D/f' = 1 : (2,9 \dots 3,8)$; $M = 2,83^x$; $2\omega = 52 \dots 19,5^\circ$ (диагональ $2y' = 7,2$ мм); $L_{06} = 59,42$ мм. В плоскости изображения введена плоскопараллельная пластина. Расфокусировка не превышает 0,005 мм во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. Пакет прикладных программ OPAL поддерживает международную форму представления асферической поверхности (АП) в

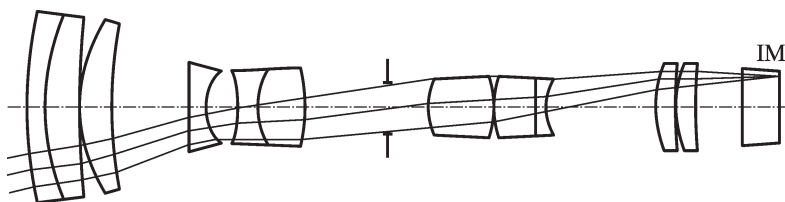


Рис. 3. Оптическая схема модифицированного варианта объектива

виде

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \dots + \alpha_n r^{2n},$$

где c — кривизна поверхности; r — радиальная координата в линейных единицах схемы; $k = e^2$ — коническая постоянная (квадрат эксцентриситета).

Асферическими задавались 6-я и 12-я поверхности второй и третьей подвижных групп СПУ, а также 20-я поверхность четвертой неподвижной группы. В результате оптимизации аберраций получен вариант с существенно отличающимися от прототипа АП 14-го порядка с эксцентриситетами $e_6^2 = 0,284$ и $e_{12}^2 = 6,445$ соответственно. Асферические линзы представляют собой гибридные линзы, в которых АП образована на слое специальной пластмассы, наплавляемом методом формовки на поверхность оптического стекла. В качестве материала пластмассы выбран полиметилметакрилат (ПММА), а в качестве материала основы — стекла ТБФ5 (во втором компоненте) и ТК23 (в третьем компоненте).

В качестве четвертой группы линз, которая оказывает существенное влияние на аберрации, особенно наклонного пучка лучей, были выбраны две одиночные положительные линзы, выполненные из легкого крона марки ЛК3, на 20-й поверхности введена АП второго порядка с эксцентриситетом $e_{20}^2 = 0,812$.

Точечные диаграммы и пятна рассеяния оптимизированного объектива рассчитывались для трех значений фокусного расстояния для нулевого пучка, который соответствует точке на оси, и первого пучка, соответствующего точке, лежащей на краю поля (из-за сложности рисунка пятна не приведены). Расчеты показали, что размер пятна рассеяния в точке на оси минимален для среднего значения фокусного расстояния и с учетом хроматических аберраций не превышает 0,008 мм, в нем сконцентрировано 81,4% энергии. При изменении фокусного расстояния размер пятна несколько увеличивается: до 0,021 мм (69,7% энергии) при минимальном фокусном расстоянии и до 0,016 мм (80,7% энергии) при максимальном фокусном расстоянии.

Размер пятна рассеяния для точки вне оси (на краю поля) при изменении фокусного расстояния изменяется в пределах от 0,008 мм до 0,018 мм. Концентрация энергии в пятне рассеяния составляет 84,8...96%. По форме точечных диаграмм можно судить о наличии небольшой комы при минимальном и среднем значениях фокусного расстояния, а также о проявлении сферической аберрации при максимальном значении фокусного расстояния. Поперечная аберрация в сагиттальном сечении при максимальном значении фокусного расстояния максимальна для красной длины волны и составляет

$\Delta x' = 0,008$ мм, при этом размер пятна рассеяния возрастает до 0,016 мм. Анализ точечных диаграмм, рассчитанных для зон углового поля, показывает, что качество изображения по полю не ухудшается.

Характер изменения дисторсии при изменении углового поля определяется как монотонно возрастающий по полю при всех значениях фокусного расстояния, значение дисторсии на краю поля изменяется от $-2,5\%$ до $+2,86\%$. Астигматические отрезки z'_m , z'_s принимают максимальные значения при минимальном и максимальном фокусном расстоянии на зоне поля, их значения не превышают $-0,01 \dots -0,015$ мм.

На рис. 4 приведены графики геометрической модуляционной передаточной функции (МПФ); расчеты проводились по ППП ОРЛ.

Из графиков МПФ (рис. 4, б) видно, что при среднем значении фокусного расстояния качество изображения близко к дифракционно-

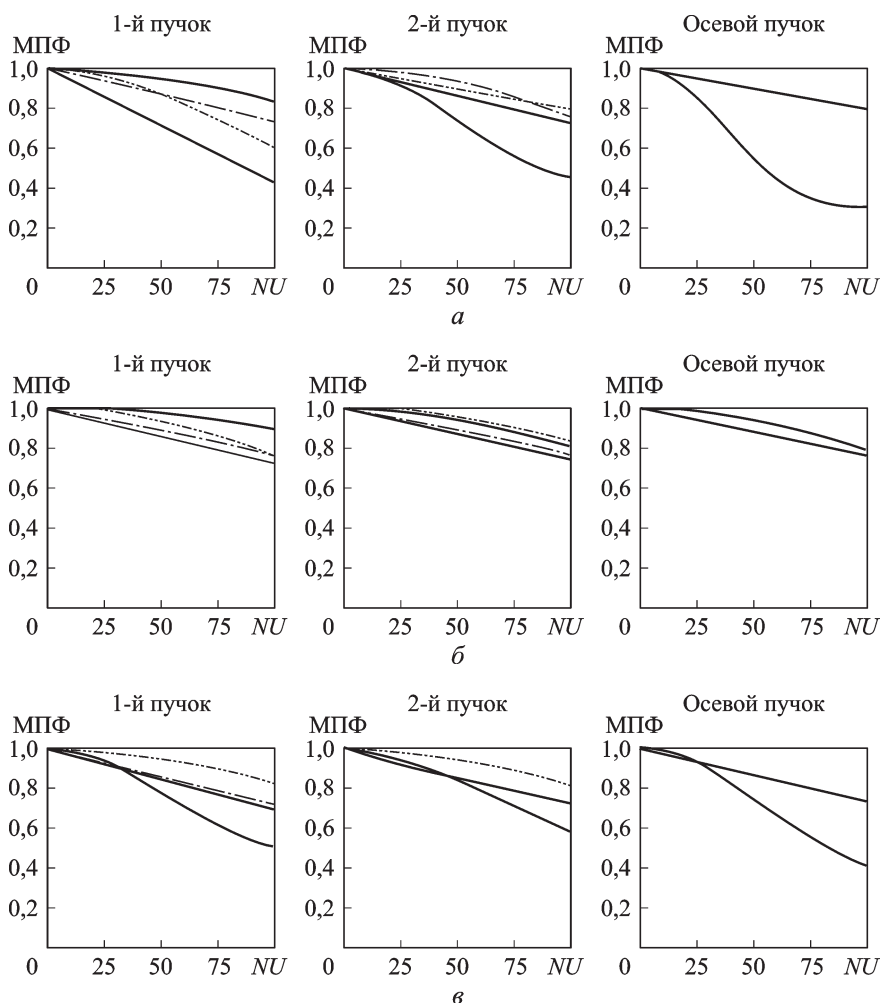


Рис. 4. Полихроматические МПФ в гауссовой плоскости для трех значений фокусного расстояния:

$f' = 7$ мм (а), 12,72 мм (б); 21,54 мм (в)

му по всему полю изображения. Контраст изображения на частоте 100 мм^{-1} в центре поля составляет 0,78 и на краю поля ($\omega = -16^\circ 14'$) для меридионального и сагиттального сечений равен 0,75/0,88 соответственно. Расчеты МПФ, проведенные для более высоких частот (150 мм^{-1} и 200 мм^{-1}), показывают, что контраст в центре поля уменьшается до 0,64 и 0,55 соответственно. На краю поля происходит падение контраста в меридиональном сечении до 0,54 и 0,36, в сагиттальном сечении падение контраста незначительно и МПФ составляет 0,79 и 0,71.

При минимальном значении фокусного расстояния (рис. 4, а) контраст изображения на частоте 100 мм^{-1} в центре поля составляет 0,31, на краю поля ($\omega = -26^\circ$) для меридионального и сагиттального сечений равен 0,62/0,82. Расчеты МПФ, проведенные для частот 150 мм^{-1} и 200 мм^{-1} , показывают, что контраст в центре поля резко падает до 0,23 и 0,17 соответственно. На краю поля происходит падение контраста в меридиональном сечении до 0,35 и 0,15, в сагиттальном сечении падение контраста существенно меньше и значения МПФ составляют 0,7 и 0,58.

При максимальном значении фокусного расстояния (рис. 4, в) контраст изображения на частоте 100 мм^{-1} в центре поля составляет 0,42, на краю поля ($\omega = -9^\circ 47'$) для меридионального и сагиттального сечений равен 0,86/0,52. Для частот 150 мм^{-1} и 200 мм^{-1} контраст в центре поля падает до 0,28 и 0,19 соответственно. На краю поля происходит падение контраста в меридиональном сечении до 0,72 и 0,57, в сагиттальном сечении падение контраста значительнее и значения МПФ составляют 0,41 и 0,38 из-за наличия сферической аберрации.

Таким образом, задача перехода к объективу на основе российского каталога оптических стекол с сохранением высокого качества изображения решена в оптической схеме объектива с использованием трех АП (двух АП 14-го порядка и одной АП 2-го порядка) с увеличением числа линз на одну по сравнению с исходной схемой [5].

Аналогичная задача перехода к объективу на основе российского каталога оптических стекол, но с возможным сохранением числа линз исходной схемы [5] и уменьшением числа используемых АП решалась с помощью пакета прикладных программ ZEMAX® [7], позволяющего проводить анализ и оптимизацию панкратических систем, в том числе их Нампет-оптимизацию с заменой марок оптического стекла. Пакет прикладных программ ZEMAX® поддерживает расчет большого числа типов АП с возможностью последующей оценки их технологичности: расчет ближней сферы, отступление от ближней сферы, среднеквадратическое отступление и т.д.

Рассмотрены шесть вариантов оптимизации исходного объектива с единой оценочной функцией. Варианты получены при последовательном введении асферизирующего слоя из ПММА на 6-ю, 7-ю, 12-ю,

14-ю, 16-ю и 18-ю поверхности исходного объектива (варианты № 6, № 7, № 12, № 14, № 16, № 18 в табл. 2–4).

Таблица 2

СКВ радиус пятна рассеяния вариантов объектива

Вариант	СКВ радиус пятна рассеяния (мкм) в функции углового поля ω (градусы)										
	0	10	18	26	0	6,3	11,3	16,3	0	6,8	9,8
	$f' = 7,5$				$f' = 12,6$				$f' = 21,3$		
Исходный	21,7	19,0	20,1	15,5	16,2	16,5	18,0	17,6	9,2	10,2	12,1
№ 6	26,5	24,4	20,9	14,6	17,2	15,4	14,9	14,9	11,6	12,8	5,4
№ 7	25,3	25,5	23,2	13,1	18,2	17,6	19,1	16,0	11,4	12,8	5,7
№ 12	8,7	6,9	5,9	7,0	3,7	3,6	3,8	3,1	3,9	5,6	5,6
№ 14	6,8	5,8	6,1	8,7	2	3,1	3,7	2,9	4,3	5,8	3,5
№ 16	2,5	2,2	2,6	3	2	2,4	2,4	10,1	2,2	2,4	4,2
№ 18	14,7	12,4	10,5	6,2	11,9	13,5	14,3	7,6	3,9	8,7	5,2

Таблица 3

Значения МПФ вариантов объектива

Вариант	Значение МПФ (мер/сар) на пространственной частоте $\nu = 100 \text{ мм}^{-1}$ при									
	0	18	26	0	11,3	16,3	0	6,8	9,8	
	$f' = 7,5$			$f' = 12,6$			$f' = 21,3$			
Исходный	0/0	0,03/0,01	0,23/0,02	0,03/0,03	0,07/0,02	0,17/0,03	0,34/0,34	0,29/0,36	0,32/0,28	
№ 6	0/0	0,04/0,03	0,11/0,11	0/0	0,10/0,01	0,09/0,11	0,3/0,3	0,33/0,29	0,41/0,16	
№ 7	0/0	0,07/0	0/0	0/0	0,15/0	0,10/0,06	0,24/0,24	0,33/0,26	0,35/0,10	
№ 12	0,6/0,6	0,51/0,65	0,37/0,52	0,71/0,71	0,55/0,64	0,49/0,62	0,48/0,48	0,33/0,43	0,32/0,43	
№ 14	0,6/0,6	0,42/0,6	0,17/0,36	0,73/0,73	0,58/0,66	0,34/0,57	0,52/0,52	0,36/0,47	0,43/0,57	
№ 16	0,67/0,67	0,66/0,69	0,51/0,64	0,68/0,68	0,51/0,56	0,21/0,57	0,58/0,58	0,37/0,68	0,31/0,6	
№ 18	0,32/0,32	0,50/0,39	0,66/0,27	0,44/0,44	0,50/0,42	0,22/0,35	0,76/0,76	0,31/0,74	0,51/0,72	

Окончательная оценка качества изображения полученных вариантов проведена с использованием среднеквадратического (СКВ) радиуса пятна рассеяния и полихроматической МПФ (см. табл. 2, 3). Значения МПФ для меридиональной и сагиттальной ориентации штрихов рассчитаны на пространственной частоте $\nu = 100 \text{ мм}^{-1}$. Указанное значение соответствует частоте Найквиста многоэлементного ПИ с размерами светочувствительной ячейки $5 \times 5 \text{ мкм}$ [8]. Выбор указанного значения пространственной частоты также позволяет провести

сравнительный анализ качества изображения полученных вариантов с объективом, оптимизированным по ППП ОРЛ.

Дисторсия приведена для трех значений f' при максимальном угловом поле объектива (см. табл. 4).

Таблица 4

Дисторсия вариантов объектива			
Вариант	Дисторсия (%) при угловом поле ω (градусы)		
	26	16,3	9,8
	$f' = 7,5$	$f' = 12,6$	$f' = 21,3$
Исходный	-14,02	-8,6	-6,2
№ 6	-8,82	-1,93	-0,03
№ 7	-8,45	-1,64	0,02
№ 12	-8,3	-2,01	-0,06
№ 14	-9,07	-2,3	-0,02
№ 16	-9,68	-2,57	0,03
№ 18	-7,2	-1,59	-0,03

Исследования показали, что наиболее эффективным является введение асферизирующего слоя из ПММА, ограниченного АП 8-го порядка, на 16-ю поверхность схемы. Это позволило получить СКВ размеры пятен для трех положений компонентов СПУ для точек на оси, краю и в зоне поля в пределах от 2,4 до 5,7 мкм, что соответствует размеру ячейки ПИ. По сравнению с приведенным вариантом объектива с тремя АП полученный объектив содержит на одну линзу меньше, имеет лишь одну АП восьмого порядка при сопоставимом качестве изображения. Асферическая поверхность формируется на основе стекла марки ТФ10 на световом диаметре 6 мм, относится к вогнутым поверхностям и характеризуется значением максимального отступления от ближней сферы сравнения в 20,2 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объективы “Nikor” фирмы Nikon Corporation (технические характеристики) www.nikonimaging.com.ru.
2. Полякова И. П., Полтырева Е. С. Исследование закона движения в двухкомпонентной панкратической системе // Оптико-механическая промышленность. – 1975. – № 10 – С. 21–25.
3. Журов С. А., Зверев В. А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. – 1999. – № 10. – С. 31–42.
4. Mark Oskotsky. Theory of two component zoom systems // Proc. of SPIE. Vol. 1527. – 1991, 37–47 p.
5. U.S. Patent 6353506B1, 359/690, 2002.

6. Р о д и о н о в С. А. Автоматизация проектирования оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1982. – 270 с.
7. Z E M A X Optical design program. User's guide. Version February 22, 2008. ZEMAX Development Corporation. – 2008. – 732 p.
8. K a r l L e n h a r d t. Optics for digital photography // Proc. of SPIE. Vol. 6834 68340W-18. 1993. – 2007.

Статья поступила в редакцию 21.04.2010

Вячеслав Георгиевич Поспехов родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области расчета оптических систем.

V.G. Pospekhov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Optical and Electronic Research Instruments” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of design of optical systems.

Тамара Сергеевна Ровенская родилась в 1947 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области расчета оптических систем.

T.S. Rovenskaya (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Optical and Electronic Research Instruments” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of design of optical systems.

Александр Владимирович Крюков родился в 1973 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1998 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области расчета оптических систем.

A.V. Kryukov (b. 1973) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Optical and Electronic Research Instruments” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of design of optical systems.