

Исследование и расчет малогабаритного панкратического объектива перископического типа

© В.Г. Поспехов, А.В. Крюков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена специфика габаритного и абберационного расчета малогабаритного панкратического объектива перископического типа. Исследованы свойства структурной схемы на основе двухгрупповой системы переменного увеличения, выявлены особенности автоматизированной коррекции схем в программах OPAL и ZEMAX, освещены вопросы построения оптимизационных моделей.

Ключевые слова: панкратический объектив, схема перископического типа, оптимизация оптических систем, объектив для мобильного телефона, камера планшетного компьютера

Введение. В настоящее время на рынке фототехники все более прочную позицию занимают цифровые фотоаппараты, которые предоставляют несравненно большие возможности получения фотографий и оперативной передачи их по электронной почте в любую точку земного шара.

Ведущие производители цифровой фототехники и оптических блоков, такие как Olympus, Canon, Nikon, Sony и др., ведут постоянную работу по созданию цифровых фотоаппаратов различных классов — от фотоаппаратов начального уровня до полупрофессиональных и профессиональных [1–3].

Среди моделей начального уровня особой популярностью пользуются компактные фотоаппараты, оснащенные панкратическими объективами с перепадом фокусных расстояний от 3 до 5, встроенной вспышкой, устройствами автофокусировки и стабилизации изображения. Основными критериями, влияющими на выбор компактной любительской цифровой камеры, являются сравнительно невысокая стоимость, малые вес и габариты, разрешение матрицы, перепад фокусных расстояний, размер дисплея для просмотра, стильный внешний вид.

В сегменте компактных фотокамер особое место занимают ультракомпактные фотоаппараты, которые получили широкое распространение благодаря применению панкратических объективов, построенных по специальной так называемой перископической оптической схеме. В первой (головной) группе объектива такого типа введены призма или зеркало, отклоняющие оптическую ось на 90° ,

что позволяет основную часть объектива размещать по вертикали в корпусе камеры, который существенно больше, чем толщина камеры. При этом снижаются требования к длине объектива и появляется возможность сократить толщину камеры. По итогам тестирования, проведенного в 2005 г. одним из зарубежных журналов по цифровой фотографии, лучшей ультракомпактной камерой признана камера Sony Cyber-shot DCC-T7, обладающая следующими характеристиками: габаритные размеры $92 \times 60 \times 15$ мм, матрица формата $1/2,5''$; 5,1 Мп; объектив перископического типа Vario-Tessar (Carl Zeiss) с фокусным расстоянием $f' = 6,3 \dots 19,0$ мм и относительным отверстием от $D/f' = 1:3,5$ до $D/f' = 1:4,4$.

Последнее пятилетие целый ряд производителей (Olympus, Nikon, Fuji и др.) работают над повышением качества изображения фотоаппаратов такого рода за счет применения ПЗС- (CCD) и КМОП- (CMOS) матриц с объемом 10 Мп (диагональ $2y' 1/2,3''$) и 12 Мп (диагональ $2y' 1/1,6''$), за счет увеличения перепада фокусных расстояний до $M = 5 \dots 7$ и углового поля при минимальном фокусном расстоянии, введения устройств стабилизации изображения.

На основе анализа сайтов ведущих производителей получены основные характеристики последнего поколения фотокамер с уменьшенными габаритами (табл. 1). В состав единого опико-электронного блока камер конструктивно входят панкратический объектив перископического типа, включающий оправы отдельных групп, элементы управления движением подвижных групп (электродвигатели для изменения фокусного расстояния и фокусировки, механизмы перемещения групп), механизм затвора, устройство стабилизации изображения, а также матрица. У всех марок фотокамер, приведенных в табл. 1, используются матрицы CCD формата $1/2,3''$.

Новое поколение ультракомпактных цифровых фотоаппаратов находит спрос также благодаря удобству при транспортировке, хорошей герметичности и ударопрочности. Некоторые образцы камер, например Olympus Mju1030SW, выполнены в водонепроницаемом корпусе, их можно применять для подводного фотографирования на глубине до 10 м, а один из последних образцов ультракомпактных камер Nikon — Nikon COOLPIX S1000pj — оснащен встроенным проектором для оперативного просмотра кадров в помещении небольшого объема.

Анализ патентных материалов, проведенный в работах [4–10], позволил определить структуру оптических схем, применяемых для разработки панкратических объективов перископического типа. В табл. 2 приведены основные характеристики ряда панкратических объективов перископического типа ведущих производителей ультра-

компактных камер. Изучение схем показало, что в основном объективы выполнены по четырехгрупповым схемам постоянной длины. Изменение фокусного расстояния осуществляется путем перемещения вдоль оптической оси двух групп, образующих систему панкратического увеличения (СПУ).

Таблица 1

Основные характеристики ультракомпактных фотокамер

Фирма, марка	Фотокамера		Число пикселей матрицы, Мп	Объектив	
	Габариты, мм	Масса, г		Фокусное расстояние f' , мм	Диафрагменное число
Fujifilm Fine-Pix Z20fd	91×56×19	110	10,0	6,0–18,0	3,7–4,2
Casio Exilim EX-V7	96×60×26	149	7,0	6,0–42,0	3,4–6,3
Sony DSC-T700	95×58×16	135	10,1	6,0–25,0	3,5–4,6
Nikon COOL-PIX S1000pj	98×60×22	145	12,0	5,4–21,4	2,8–5,8
Samsung i85	95×62×20	158	8,2	6,0–30,0	3,5–4,9
Olympus Mju1030 SW	93×61×21	173	10,0	5,1–20,3	3,5–5,1

Таблица 2

Основные характеристики панкратических объективов перископического типа

Фирма	Фокусное расстояние f' , мм	Угловое поле ω , град	Длина L , мм	Диафрагменное число	Число линз / асферических поверхностей	Число групп / подвижных групп
Olympus	6,0–14,0	32,7–13,9	58,1	2,5–4,5	9/3	4/2
Minolta	5,9–33,7	31,4–6,3	71,1	2,8–3,6	9/4	4/3
Sony	6,9–20,7	30,2–10,4	48,4	3,6–4,3	10/5	5/2
HoYa	6,3–16,6	31,0–12,0	44,8	2,9–5,6	10/5	4/3
Olympus	3,2–9,7	32,5–11,5	38,5	2,5–4,3	9/3	4/2
Olympus	3,2–9,7	32,2–22,2	38,0	2,7–4,6	9/3	4/2

Объектив фирмы Minolta [4] построен на основе СПУ из группы отрицательной (вторая группа) и положительной (третья группа) оптических сил, первая и четвертая группы — неподвижные, положительной оптической силы.

Объектив фирмы Sony [10] включает положительную пятую группу, которая перемещается перпендикулярно оптической оси для

компенсации вибраций; компенсация смещения плоскости изображения и фокусировка на конечные дистанции осуществляется перемещением четвертой группы положительной оптической силы. Изменение фокусного расстояния происходит за счет перемещения второй группы отрицательной оптической силы, первая группа положительной силы — неподвижная.

Представляет интерес один из вариантов объективов фирмы Olympus [7], рассчитанных на диагональ матрицы 4 мм: он имеет наименьшую длину из рассматриваемых объективов. Это достигнуто, как будет показано ниже, за счет особенностей построения СПУ и одной из ее групп.

Исследования свойств структурной схемы объектива-аналога в области габаритного расчета. В качестве аналога выбрана схема объектива, структурное построение которой показано на рис. 1.

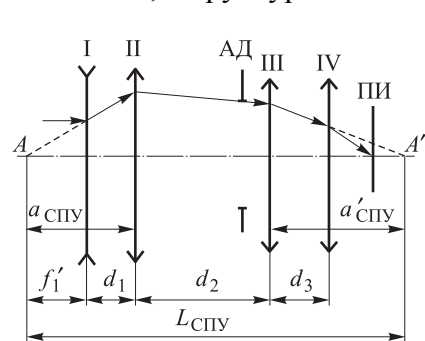


Рис. 1. Структурная схема построения объектива-аналога

Объектив представляет собой четырехгрупповую систему: первая и четвертая группы линз отрицательной и положительной оптических сил соответственно являются неподвижными, а вторая и третья группы положительной оптической силы образуют СПУ и перемещаются с целью изменения фокусного расстояния.

В табл. 3 приведены значения основных параметров групп (фокусного расстояния, положения передней и задней главных плоскостей) объектива-аналога, определенные после подбора отечественных марок стекол, от которых отталкивались при расчете объектива.

Таблица 3

Значения основных параметров групп объектива-аналога

Номер группы	Номер поверхности	Фокусное расстояние f' , мм	Положение главной плоскости		Сумма толщин Σd , мм
			передней s_H , мм	задней s'_H , мм	
1	1–8	–6,093	2,509	–4,063	11,65
2	9–14	8,047	0,267	–2,968	4,65
3	15–16	52,276	–1,259	–1,885	1,00
4	17–19	36,212	1,309	0,102	2,15

Основные формулы для расчета объектива приведены ниже:

$$f'_\Sigma = f'_1 \beta_{СПУ} \beta_4; \quad d_1 = f'_1 - a_{СПУ}; \quad d_2 = d_{СПУ}; \quad d_3 = a'_{СПУ} - a_4; \\ a_4 = \frac{1 - \beta_4}{\beta_4} f'_4; \quad a'_F = a'_4 = (1 - \beta_4) f'_4; \quad L_{об} = d_1 + d_2 + d_3 + a'_F, \quad (1)$$

где $L_{об}$ — длина объектива; f'_i , a'_i , β_i — фокусные расстояния, задние отрезки и линейные увеличения i -й группы линз объектива; d_i — воздушные промежутки после i -й группы; индекс СПУ относится к параметрам всей системы переменного увеличения (вторая и третья группы линз на рис. 1).

При расчете параметров панкратического объектива задают следующие оптические характеристики объектива:

значения минимального (или максимального) фокусного расстояния $f'_{\Sigma \min}$ ($f'_{\Sigma \max}$);

перепад фокусных расстояний $M = f'_{\Sigma \max} / f'_{\Sigma \min}$;

длину $L_{об}$ объектива или задний фокальный отрезок a'_F ;

угловое поле 2ω в пространстве предметов или диагональ $2y'$ матрицы (приемника изображения);

диафрагменное число f' / D .

Расчет двухгрупповой СПУ. Расчет схемы панкратического объектива начинают с выбора типа оптической схемы и параметров двухгрупповой СПУ: k , f'_2 , $L_{СПУ}$, где $k = f'_1 / f'_2$ — отношение фокусных расстояний первой и второй групп СПУ, $L_{СПУ}$ — длина СПУ. Далее проводят расчет взаимного положения групп при изменении увеличения СПУ и уточняют области их значений.

Для определения параметров СПУ ($L_{СПУ}$, $a_{СПУ}$, $a'_{СПУ}$, $\beta_{СПУ \min}$) и установления закона перемещения групп проведен расчет осевого луча для минимального фокусного расстояния всего объектива. В результате получены следующие значения, которые использованы при расчете взаимного положения групп: $L_{СПУ} = 31,575$ мм; $\beta_{СПУ \min} = -0,5706$; $k = 0,1539$; $f'_2 = 52,276$ мм.

Система панкратического увеличения объектива относится к типу систем с характеристиками $f'_1 > 0$, $f'_2 > 0$, $L_{СПУ} > 0$, $\beta_{СПУ} < 0$; свойства такой системы изучены ранее [11]. Также в работе [11] даны рекомендации по выбору значений фокусных расстояний, согласно которым для получения положительного значения расстояния d между главными плоскостями подвижных групп на всем диапазоне изменения увеличения фокусное расстояние f'_2 второй группы следует выбирать из соотношения

$$\frac{k+1}{4k}L_{\text{СПУ}} > f'_2 > \frac{1}{4k}L_{\text{СПУ}}. \quad (2)$$

Графически неравенство можно представить двумя гиперболами. Область допустимых значений фокусного расстояния второй группы f'_2 при различных значениях отношения k лежит между гиперболами [11].

Расчет параметров СПУ проведен по формулам из работы [11]. Для создания СПУ с меньшими габаритами использовано решение, которое получается при выборе знака «минус» перед корнем в выражении для d . Недостатком такого типа СПУ являются положительные значения обоих фокусных расстояний, что создает трудности при исправлении кривизны поля.

Как показали исследования, проведенные авторами данной работы, возможно применение соотношений k , f'_2 , $L_{\text{СПУ}}$, при которых условие $d > 0$ не выполняется. Напротив, условие $d < 0$ на всем или на части диапазона изменения увеличения $\beta_{\text{СПУ}}$ дает возможность несколько сократить габариты объектива. Однако при отрицательных значениях d переход к группам с конечными толщинами осуществим лишь в случае применения особой конструкции по крайней мере одной из групп, у которой главные плоскости вынесены за пределы толщин группы.

Для выбора области предпочтительных значений k , f'_2 проведены расчеты предельных значений параметров СПУ. Предельные значения фокусных расстояний f'_2 , полученные из неравенства (2) при $L_{\text{СПУ}} = 31,575$ мм, сведены в табл. 4. По значению $f'_{2\text{min}}$ находили значения увеличений β_1, β_2 , при которых расстояние d обращается в нуль. Отношение $M = \frac{\beta_2}{\beta_1}$ является максимальным перепадом увеличений, который может быть реализован при конструкции групп с традиционным положением главных плоскостей.

При выборе промежуточных значений f'_2 и переходе к группам конечной толщины перепад увеличений сокращается, при выборе значения фокусного расстояния равным $f'_{2\text{max}}$ реализация панкратической системы возможна лишь при отрицательных значениях расстояния d между главными плоскостями групп. Расчет взаимных положений групп (d , $a_{\text{СПУ}}$, $a'_{\text{СПУ}}$) при $L_{\text{СПУ}} = 31,575$ мм и значениях $k = 0,1539 \dots 0,5000$, а также $f'_2 = 21,93 \dots 52,28$, взятых в диапазоне предельных значений, был проведен по методике, описанной в работе [11].

Предельные значения параметров СПУ

k	β_1	β_2	M	$f_2'_{\max}$, мм	$f_2'_{\min}$, мм
0,1539	-0,491	-2,037	4,15	59,174	51,28
0,2000	-0,420	-2,380	5,67	47,362	39,468
0,3000	-0,350	-2,849	8,14	34,206	26,312
0,5000	-0,268	-3,732	13,92	23,681	15,788

Численные расчеты показали, что при росте значений k уменьшается размер отрезка $a'_{СПУ}$, что ограничивает возможность получения требуемого заднего фокального отрезка, а также расширяется область значений $\beta_{СПУ}$, в которой возрастают отрицательные значения d . Выбор благоприятных соотношений параметров СПУ зависит от требований, предъявляемых к параметрам объектива, а также от величины выноса главных плоскостей во второй группе СПУ.

В связи с этим проведены исследования и предложена методика расчета положительной группы линз с отрицательным или близким к нулю значением S_{IV} , а также с вынесенными вперед главными плоскостями. Методика и примеры расчета группы линз с такими свойствами приведены в работе [12]. Один из возможных вариантов данной системы, реализован при разработке оптической схемы объектива.

Полученные результаты использованы на этапе оптимизации конструктивных параметров объектива.

Исследования в области абберационного расчета. Для поиска оптимального решения оптической схемы панкратического объектива проведен параметрический синтез вариантов объектива с применением различных моделей оценочных функций с использованием подпрограмм оптимизации пакетов прикладных программ ZEMAX [13] и OPAL, которые позволяют проводить анализ и оптимизацию панкратических (многоконфигурационных) систем. В программе ZEMAX имеется возможность использования Hammer-оптимизации с заменой марок оптического стекла. В этом случае осуществляется дискретный выбор стекол из заданного каталога, что может быть использовано при переходе от оптического стекла зарубежных марок к стеклам из российского каталога.

В программах имеется возможность комплексной оценки качества изображения оптических систем по таким критериям, как среднеквадратичный (СКВ) радиус пятна рассеяния и полихроматическая модуляционная передаточная функция (МПФ).

Учитывая, что методы задания асферических поверхностей (АП) в программах различны, был проведен сравнительный абберацион-

ный анализ одного и того же варианта объектива (1S12S71) в двух программах. Кроме того, для указанного варианта выполнен расчет МПФ в программе ZEMAX и аналогичной частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) в программе OPAL. Результаты расчета (табл. 5) показали близкие значения, полученные по этим программам.

Таблица 5

**Результаты расчетов объектива-аналога
в программах OPAL И ZEMAX**

Название характеристики или аберрации	Значение по программе		Несоответствие результатов, %
	OPAL	ZEMAX	
Минимальное фокусное расстояние f' , мм	3,2571	3,2571	0
Задний фокальный отрезок $s'_{F'}$, мм	0,9995	0,9995	0
Сферическая аберрация:			
$\Delta s'(m = 1)$	-0,0096	-0,0091	5,2
$\Delta y'(m = 1)$	-0,0019	-0,0018	5,2
Астигматические отрезки:			
$z'_m(\omega = 32^\circ)$	-0,0243	-0,0206	15,2
$z'_s(\omega = 32^\circ)$	-0,0400	-0,0402	0,5
Дисторсия $\Delta y'_d(\omega = 32^\circ)$	-5,13	-5,03	2,0
Хроматизм положения $\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2}$ ($m = 0$)	-0,0024	-0,0024	0
Хроматизм увеличения $\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2}$ ($m = 0, \omega = 32^\circ$)	0,0043	0,0044	2,3
МПФ $T_0(\nu = 120 \text{ мм}^{-1}, \omega = 0^\circ)$	0,66	0,66	0
МПФ $T_m/T_s(\nu = 120 \text{ мм}^{-1}, \omega = 17^\circ)$	0,07/0,47	0,11/0,48	4,0/1,0
МПФ $T_m/T_s(\nu = 120 \text{ мм}^{-1}, \omega = 24^\circ)$	0,03/0,21	0,07/0,28	4,0/7,0
МПФ $T_m/T_s(\nu = 120 \text{ мм}^{-1}, \omega = 32^\circ)$	0,08/0,26	0,07/0,32	1,0/6,0

Особенности автоматизированной коррекции аберраций по программе OPAL. В качестве исходного варианта использован модифицированный вариант оптической схемы, полученный на этапе габаритного расчета. Форма асферических поверхностей задана такой же, как в объективе-аналоге.

В процессе работы был разработан ряд оптимизационных моделей и проведен параметрический синтез. В качестве параметров взяты радиусы кривизны, за исключением радиусов кривизны головной призмы и фильтра, переменные воздушные промежутки d_8, d_{11}, d_{16} , а также эксцентриситеты (ES2, ES10, ES19) и коэффициенты уравне-

ний асферических поверхностей. При отсутствии ограничений на минимальные значения воздушных промежутков d_8 , d_{11} , d_{16} , в процессе оптимизации один из воздушных промежутков становился отрицательным. Это же явление имело место при задании ограничений на воздушные промежутки в виде неравенства $D < (8, 14, 16) = 0,3$. Более жестко удерживались значения воздушных промежутков при задании ограничений в виде совокупности операторов, позволяющих применять метод штрафных функций, $INF(1-3)=D/8,D/14,D/16$; $INF<(1-3)=0,3$; $INFT(1-3)=0,005$. Фокусное расстояние и положение плоскости изображения удерживались постоянными с помощью операторов $VG0/1-21/FN^*$, $SG'21/N^*$.

Для трех фокусных расстояний (минимального, среднего и максимального) проводили исправление поперечных aberrаций в осевом пучке лучей: сферическая aberrация (DYA) на краю и в зоне входного зрачка (лучи 01 и 03), сферохроматическая aberrация в зоне зрачка (DYA/0'3). В наклонных пучках лучей для края поля (ω_{\max}) и зоны поля ($\omega = 0,707\omega_{\max}$) исправляли aberrации узкого пучка лучей: астигматические отрезки для меридионального z'_m и сагиттального z'_s сечений, хроматическая aberrация увеличения и дисторсия. В меридиональном сечении наклонных пучков исправляли aberrации для верхней и нижней части зрачка (пучка лучей) как минимум для двух зон зрачка.

Практика показала, что при оптимизации необходимо задавать желаемое значение дисторсии, отличное от нуля. В противном случае трудно получить оптимальное решение.

Различные варианты оптимизаторов, отличающиеся количеством лучей в осевом и наклонных пучках, а также требованиями к значениям исправляемых aberrаций, были опробованы в процессе поиска оптимального варианта оптической схемы объектива. Исследования показали, что более эффективным является сочетание двух методов оптимизации: на начальном этапе — оптимизация по ограниченному количеству геометрических aberrаций, а на конечном этапе — переход к оптимизации по волновым aberrациям.

Эффективными параметрами коррекции aberrаций являются параметры АП как эксцентриситеты, так и коэффициенты уравнений высшего порядка.

Результаты aberrационного расчета одного из вариантов разработанного объектива представлены далее.

Особенности автоматизированной коррекции aberrаций по программе ZEMAX. Световые диаметры линз панкратического объектива изменяются в зависимости от фокусного расстояния объектива. В связи с этим требуется провести расчет значений световых

диаметров для всех положений групп объектива и выбора максимальных значений. В программе ZEMAX эта процедура реализована через функцию Maximum при задании световых высот поверхностей схемы.

Замена материалов, заданных в исходной схеме значениями показателя преломления и числом Аббе, на марки оптического стекла из российского каталога осуществлена с использованием встроенного в программу модуля Glass Catalogue (каталог стекла).

В качестве параметров оптимизации использованы кривизны всех поверхностей объектива, а также коэффициенты четвертого, шестого и восьмого порядков уравнений, описывающих профили АП. При автоматизированной коррекции по программе ZEMAX квадрат эксцентриситета не изменяли, он был задан равным нулю, как и в исходной схеме. Изменения радиусов кривизны приводят к перераспределению оптических сил между компонентами панкратического объектива, что влечет изменение масштаба изображения и фокусных расстояний, в результате необходима корректировка законов перемещения подвижных групп линз. В связи с этим в качестве параметров оптимизации использованы также воздушные промежутки схемы и толщины линз по оси. Осевые толщины призмы и защитной плоскопараллельной пластинки приемника излучения остались без изменения.

Оценочная функция оптимизационной модели строится на основе ряда функций-ограничений на оптические и габаритные характеристики, а также функций, связанных с показателями качества оптической системы.

Ограничения введены на минимальные толщины по оси и краю линз и воздушных промежутков и продольную длину системы для всего диапазона изменения фокусного расстояния объектива. Поскольку первая и четвертая группы линз неподвижны, общая длина системы от первой поверхности до плоскости изображения остается неизменной и составляет $L = 35,9$ мм. Указанное условие задано в программе с помощью оператора TOTR. Требуемые значения фокусных расстояний объектива для широкоугольного, среднего и длиннофокусного положений компонентов задаются в оптимизационной модели с помощью оператора EFFL.

Основную роль в создании оценочной функции оптимизационной модели выполняют операторы, использующие критерии оценки качества изображения. Программа ZEMAX, как и программа OPAL, позволяет строить такую модель на основе геометрических и волновых aberrаций.

Особенностью программы ZEMAX является использование марок, описывающих СКВ-размеры пятен рассеяния, т. е. интегральный

критерий оценки. Для контроля дисторсии в оптимизационной модели программы ZEMAX задают ограничения на ее значения. Максимальное значение дисторсии, равное 4,2 %, задавали с помощью оператора DIMX для минимального и максимального фокусных расстояний объектива.

Использование геометрического и волнового критериев оценки качества изображения приводит к построению принципиально разных оценочных функций. Рассмотрены четыре варианта построения оптимизационной модели с различными оценочными функциями. Вариант оптической схемы SPOT(ZEMAX) получен при оптимизации исходной схемы по геометрическим aberrациям, вариант OPD(ZEMAX) — оптимизацией по волновым aberrациям (англ. OPD — Optical Path Difference — волновая aberrация), вариант OPD-Hammer (ZEMAX) — с помощью Hammer-оптимизации по волновым aberrациям. Hammer-оптимизация исходной схемы по геометрическим aberrациям не привела к улучшению ее aberrационной коррекции.

Оценка качества изображения исходной схемы и полученных вариантов проведена с использованием таких критериев, как СКВ-радиус пятна рассеяния и значение полихроматической МПФ для меридиональной и сагитальной ориентации штрихов на пространственной частоте $\nu = 120 \text{ мм}^{-1}$ (табл. 6, 7). Выбранное значение частоты соответствует частоте Найквиста многоэлементного приемника излучения с размерами отдельной светочувствительной ячейки (пиксела) $4,2 \times 4,2 \text{ мкм}$.

При использовании оптимизации по геометрическим aberrациям удалось добиться уменьшения СКВ-размеров пятна рассеяния во всем диапазоне изменения фокусного расстояния. Полученные в результате оптимизации СКВ-радиусы пятен рассеяния соизмеримы с радиусом кружка Эйри.

Однако контраст изображения нельзя считать оптимальным. Оптимизация с использованием волновых aberrаций приводит к значительному росту СКВ- и геометрических размеров пятен рассеяния. Дисторсия при этом также возрастает до +4 % в длиннофокусном положении. Анализ поведения графиков МПФ показывает эффективность оптимизации по волновым aberrациям для улучшения контраста в изображении для низких и высоких ($\nu = 120 \text{ мм}^{-1}$) пространственных частот. Кроме того, достижение окончательного решения при использовании волнового критерия потребовало около 40 циклов оптимизации, в то время как поиск минимума оценочной функции, построенной на геометрических aberrациях, занял более 500 циклов. Это свидетельствует о высокой сходимости процесса оптимизации на основе волновых aberrаций.

Таблица 6

СКВ-радиус пятна рассеяния, мкм, объективов для трехфокусных расстояний в зависимости от углового поля

Вариант	Фокусное расстояние f'													
	3,25						5,64						9,75	
	Угловое поле ω , град													
	0,0	22,4	27,5	32,1	0,0	14,6	18,2	21,1	0	8,4	12,1			
Исходный (ZEMAX)	1,32	5,15	4,73	6,89	4,09	8,48	11,09	10,38	1,43	3,40	6,85			
SPOT (ZEMAX)	1,92	3,44	2,78	3,30	2,26	3,21	3,61	3,14	1,24	1,71	3,29			
OPD (ZEMAX)	10,18	6,99	5,83	5,47	15,17	17,66	18,49	19,77	18,40	24,50	31,46			
OPD Hammer (ZEMAX)	4,80	3,88	3,85	4,04	2,40	13,55	13,76	14,48	4,11	19,20	24,18			

Таблица 7

Значения МПФ (меридиональные/сагитальные) объективов для трех фокусных расстояний на пространственной частоте $\nu = 120 \text{ мм}^{-1}$

Вариант	Фокусное расстояние f'													
	3,25						5,64						9,75	
	Угловое поле ω , град													
	0,0	22,4	27,5	32,1	0,0	14,6	21,1	0	8,4	12,1				
Исходный (ZEMAX)	0,65	0,08/0,26	0,12/0,29	0,12	0,13/0,46	0,28/0,56	0,52	0,30/0,47	0,27/0,39					
SPOT (ZEMAX)	0,43	0,15/0,71	0,20/0,63	0,60	0,34/0,58	0,25/0,60	0,57	0,48/0,54	0,19/0,54					
SPOT (OPAL)	0,20	0,16/0,63	0,16/0,65	0,63	0,21/0,56	0,37/0,57	0,50	0,41/0,48	0,10/0,47					
OPD (ZEMAX)	0,66	0,39/0,63	0,46/0,63	0,35	0,42/0,51	0,35/0,50	0,43	0,32/0,40	0,16/0,41					
OPD Hammer (ZEMAX)	0,57	0,43/0,59	0,43/0,55	0,48	0,34/0,45	0,40/0,50	0,35	0,33/0,37	0,34/0,40					
OPT (OPAL)	0,67	0,49/0,59	0,46/0,61	0,61	0,32/0,42	0,48/0,53	0,51	0,46/0,49	0,19/0,44					

Наммер-оптимизация исходной схемы по геометрическим aberrациям не привела к улучшению aberrационной коррекции объектива, а в результате Наммер-оптимизации по волновому критерию достигнуто определенное улучшение качества изображения исходного варианта. Однако, целесообразность Наммер-оптимизации необходимо оценивать после рассмотрения возможности применения выбранных марок оптических стекол.

Оценка результатов aberrационного расчета объектива. Поскольку aberrационную коррекцию в программе OPAL проводили по геометрическим aberrациям и при этом задавали численные значения отдельных aberrаций, то представляет интерес рассмотрение их окончательных значений и сопоставление с такими интегральными критериями качества, как ЧКХ и распределение энергии в пятне рассеяния.

Графики продольной и поперечной сферической aberrаций для точки на оси приведены на рис. 2, а графики узкого пучка лучей — на рис. 3.

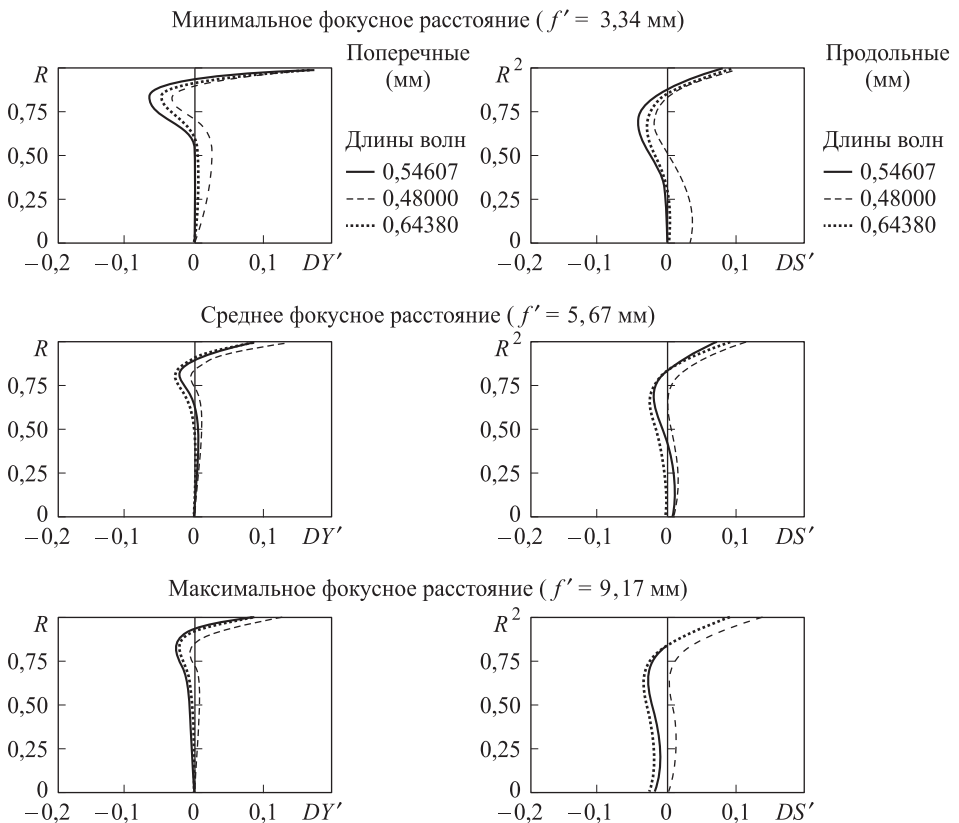


Рис. 2. Поперечные (а) и продольные (б) aberrации осевого пучка лучей панкратического объектива (7112RD5) для трех фокусных расстояний

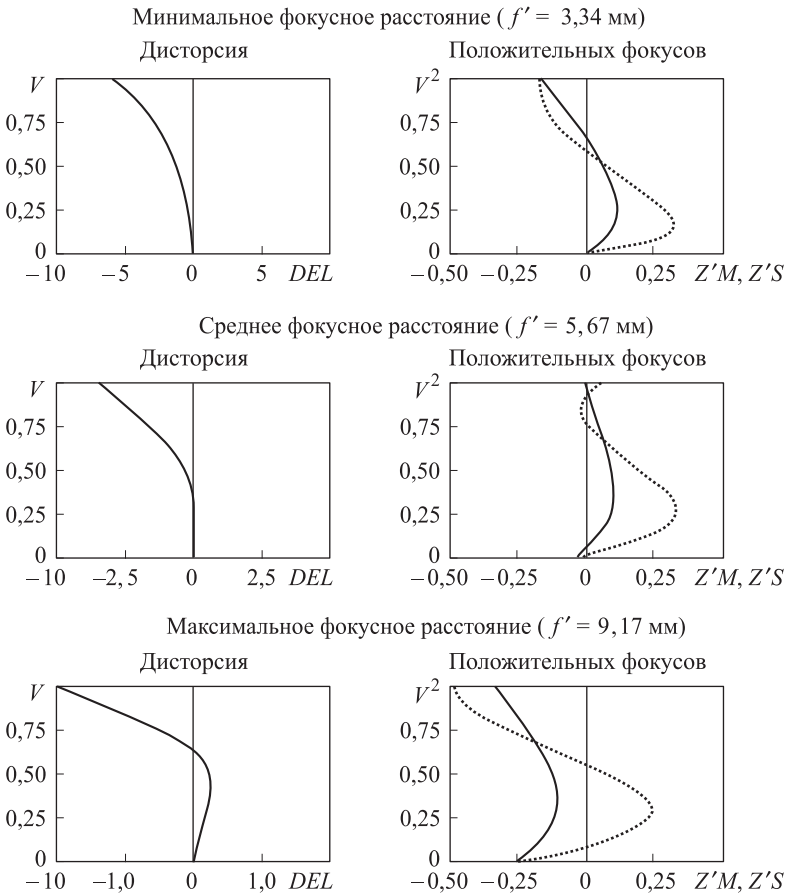


Рис. 3. Аберрации узкого пучка лучей панкратического объектива (7112RD5) для трех фокусных расстояний

Исследовав данные графиков аберраций и результаты аберрационного расчета, видим, что поперечная сферическая аберрация во всем диапазоне изменения фокусного расстояния не превышает 0,013 мм. Дисторсия изменяется в пределах значений $-5,0 \dots -2,5$ %, значения z'_m астигматических отрезков в меридиональном сечении пучка не превышают $-0,048$ мм на краю поля и $+0,065$ мм в зоне поля, а в сагиттальном сечении соответственно $+0,033$ мм и $+0,019$ мм.

К недостаткам аберрационной коррекции следует отнести наличие провала в графиках зависимости астигматических отрезков в зоне поля $\omega = 0,5\omega_{\max}$, что приводит к падению контраста в зоне поля $\omega = 0,5\omega_{\max}$. Более полное представление о качестве изображения дают модуляционные передаточные функции (МПФ–ЧКХ), приведенные на рис. 4, 5.

Согласно анализу ЧКХ, на частоте 120 мм^{-1} контраст для точки на оси находится в пределах значений $0,67 \dots 0,51$ во всем диапазоне

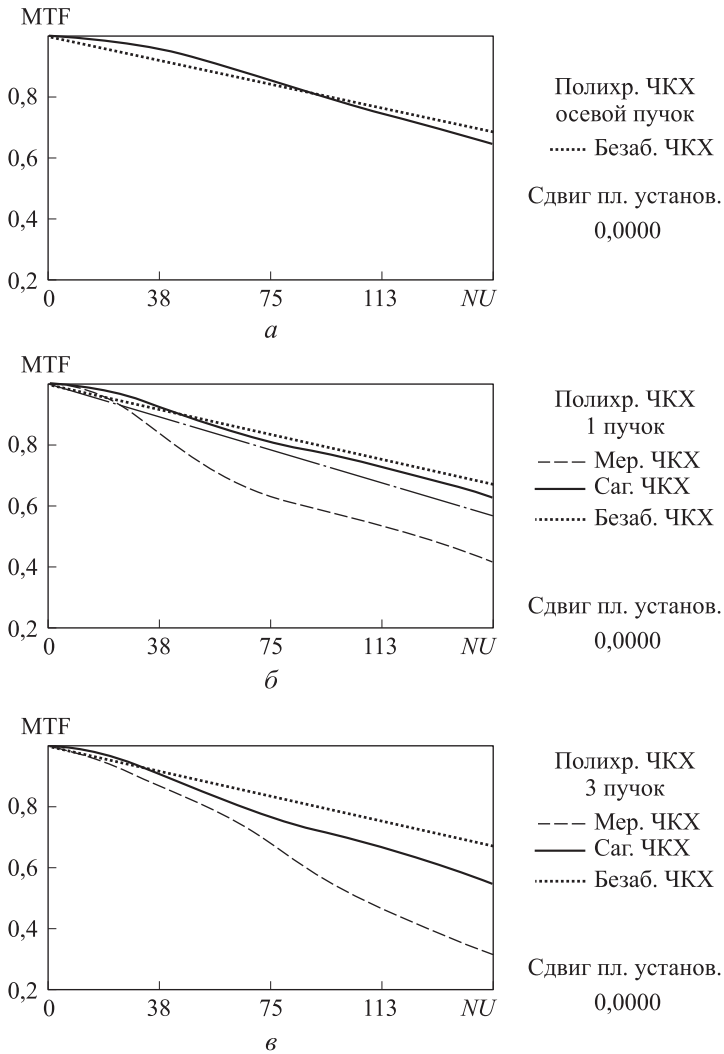


Рис. 4. Модуляционные передаточные функции (ЧКХ) панкреатического объектива (7112RD5) при минимальном фокусном расстоянии ($f' = 3,34$ мм): *a* — ЧКХ для точки на оси ($\omega = 0$); *б* — ЧКХ для точки вне оси ($\omega = \omega_{\max}$); *в* — ЧКХ для точки вне оси ($\omega = 0,5\omega_{\max}$)

изменения фокусного расстояния. Для точки вне оси на краю поля ($\omega = \omega_{\max}$) для максимального фокусного расстояния значения контраста выше 0,19. Для среднего фокусного расстояния на указанной частоте в зоне поля ($\omega = 0,5\omega_{\max}$) отмечается падение контраста до 0,10 ввиду наличия остаточного астигматизма.

Анализ распределения энергии в пятне рассеяния показал, что в пятне размером 8,6 мкм на оси заключается 90...96 % энергии; на краю поля ($\omega = \omega_{\max}$) и в зоне поля ($\omega = 0,5\omega_{\max}$) — 70...85 % для всего диапазона изменения фокусного расстояния.

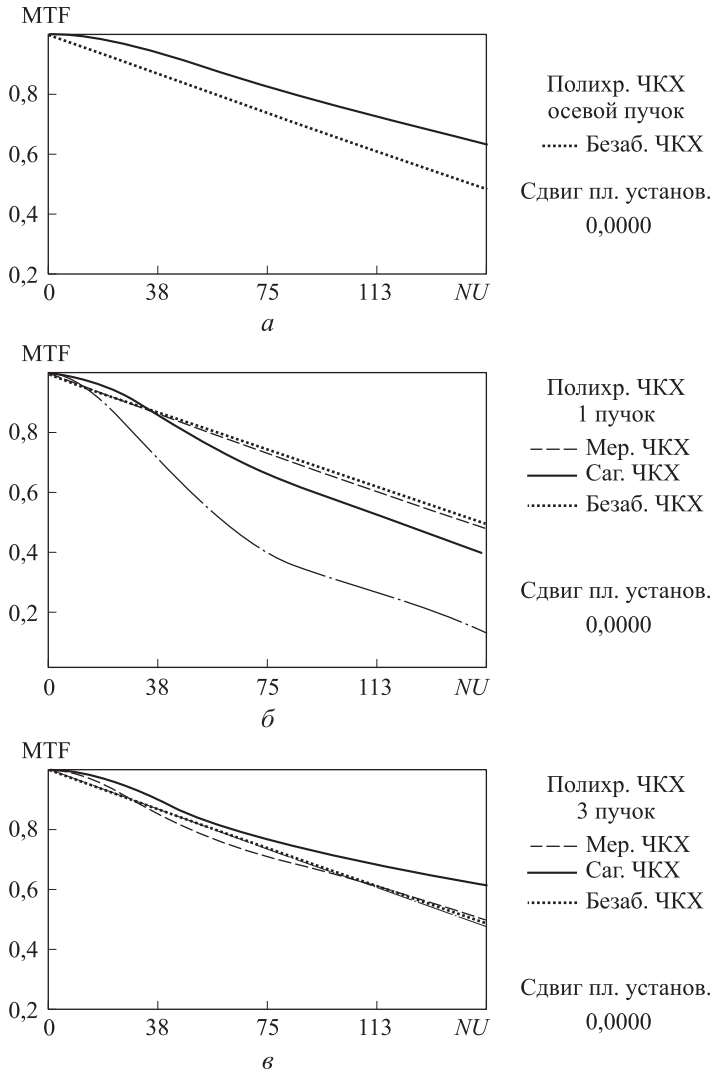


Рис. 5. Модуляционные передаточные функции (ЧКХ) панкратического объектива (7112RD5) для максимального фокусного расстояния ($f' = 9,17$ мм): *а* — ЧКХ для точки на оси ($\omega = 0$); *б* — ЧКХ для точки вне оси ($\omega = \omega_{\max}$); *в* — ЧКХ для точки вне оси ($\omega = 0,5\omega_{\max}$)

Расчетно-технологические аспекты изготовления асферических поверхностей. Технологичность АП схем, полученных после оптимизации в программах ZEMAX и OPAL, подтверждается данными, которые являются результатом расчетов профилей поверхностей в программе ZEMAX (табл. 8, 9). Для всех указанных АП объектива SPOT показатель преломления стекла линз составляет 1,744; марка стекла асферической линзы — СТК19, квадрат эксцентриситета ($e^2 = -k$) имеет нулевое значение, порядок АП соответствует восьми.

Таблица 8

Технологические параметры АП объектива SPOT (ZEMAX)

Параметр АП	Номер асферической поверхности в оптической схеме		
	№ 2	№ 10	№ 19
Радиус кривизны при вершине, мм	4,944	4,047	-16,832
Световой диаметр, мм	7,2	4,6	4,3
Тип поверхности	Вогнутая	Выпуклая	Выпуклая
Коэффициент задающего уравнения:			
α_1	0	0	0
α_2	$-1,824 \cdot 10^{-4}$	$-9,192 \cdot 10^{-4}$	$6,807 \cdot 10^{-4}$
α_3	$-2,328 \cdot 10^{-5}$	$-2,823 \cdot 10^{-5}$	$2,366 \cdot 10^{-4}$
α_4	$-5,577 \cdot 10^{-8}$	$-2,212 \cdot 10^{-6}$	$-2,727 \cdot 10^{-5}$
Максимальное отступление от ближайшей сферы, мкм	17,2	6,3	7,0
Знакопеременное отступление	Нет		

Таблица 9

Технологические параметры АП объектива OPT (OPAL)

Параметр АП	Номер асферической поверхности в оптической схеме		
	№ 2	№ 10	№ 19
Радиус кривизны при вершине, мм	5,462	9,921	-7,205
Световой диаметр, мм	7,2	4,6	4,4
Тип поверхности	Вогнутая	Выпуклая	Выпуклая
Показатель преломления стекла линзы	1,765	1,744	1,744
Марка стекла	СТК20	СТК19	СТК19
Порядок АП	12	12	12
Квадрат эксцентриситета, $e^2 = -k$	-0,114221	-0,031085	17,00074
Коэффициент задающего уравнения:			
α_1	0	0	0
α_2	$1,690 \cdot 10^{-4}$	$-8,908 \cdot 10^{-4}$	$-1,652 \cdot 10^{-3}$
α_3	$-1,605 \cdot 10^{-5}$	$-1,767 \cdot 10^{-7}$	$-6,000 \cdot 10^{-4}$
α_4	$9,207 \cdot 10^{-7}$	$-1,642 \cdot 10^{-6}$	$6,531 \cdot 10^{-5}$
α_5	$-3,116 \cdot 10^{-8}$	$-2,133 \cdot 10^{-7}$	$1,878 \cdot 10^{-6}$
α_6	$1,540 \cdot 10^{-9}$	$-2,751 \cdot 10^{-7}$	$6,869 \cdot 10^{-7}$
Максимальное отступление от ближайшей сферы, мкм	7,9	7,2	4,9
Знакопеременное отступление	Нет		

Проанализировав полученные результаты (см. табл. 8, 9), можно сделать следующие выводы:

- все рассчитанные АП обеспечивают технологически выполнимые требования к максимальному отклонению от ближайшей сферы, которое не превышает 17,2 мкм;

- рассчитанные профили поверхностей обеспечивают отступление от ближайшей сферы одного знака, что также является более технологичным по сравнению со знакопеременными АП;

- при оптимизации в программе OPAL рассчитаны АП, описываемые полиномами 12-го порядка, которые задают отклонения от поверхностей второго порядка. Для рассчитанного варианта такие поверхности второго порядка также являются несферическими и задаются конической постоянной (эксцентриситетом);

- вариант объектива, полученный при оптимизации в программе ZEMAX, содержит АП восьмого порядка, причем коническая постоянная для всех рассчитанных поверхностей равна нулю.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана оптическая схема малогабаритного панкратического объектива

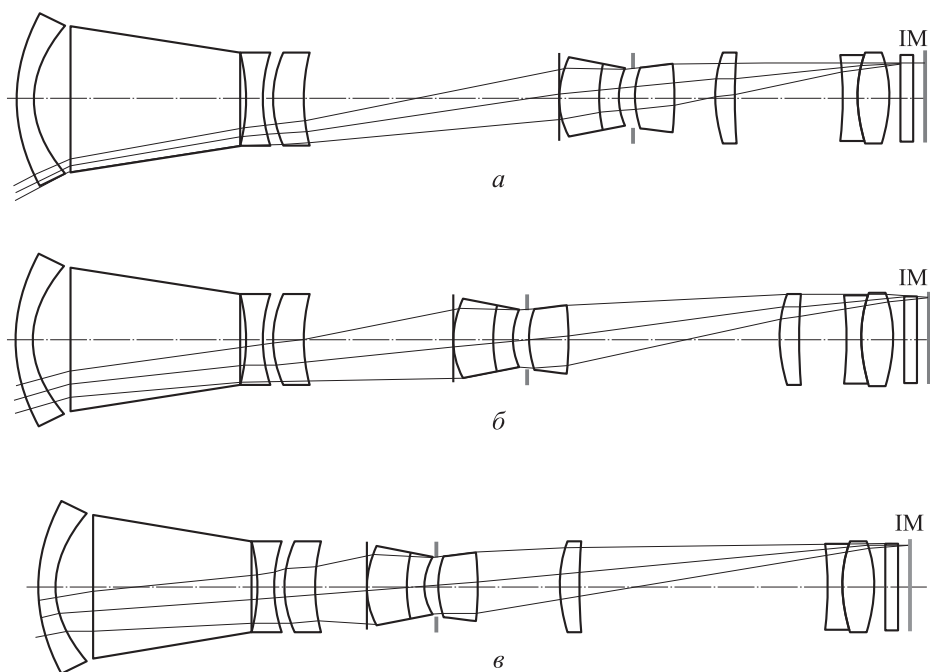


Рис. 6. Оптическая схема панкратического объектива (7112RD5) для трех значений фокусного расстояния:

a — положение подвижных групп при фокусном расстоянии $f' = 3,34$ мм; *б* — положение подвижных групп при фокусном расстоянии $f' = 5,67$ мм; *в* — положение подвижных групп при максимальном фокусном расстоянии $f' = 9,17$ мм

перископического типа высокого качества на диагональ кадра 1/4" со следующими характеристиками: $f' = 3,34$ мм, $M = 2,95$, D/f' изменяется от 1:3 до 1:5,3, общая длина $L = 37,1$ мм, диаметр первой поверхности $\varnothing_1 = 8,6$ мм, диаметр последней поверхности $\varnothing_{23} = 4$ мм, угол излома — 90° , расстояние до точки излома — $31,45$ мм, разрешение — 150 мм^{-1} . Оптическая схема объектива приведена на рис. 6.

Наиболее высокие характеристики качества достигнуты для объектива 7112RD0, в котором удалось добиться повышения минимального контраста до 0,38 на частоте 150 мм^{-1} и устранить зональные провалы ЧКХ за счет уменьшения астигматических отрезков. При этом на последней поверхности получена более монотонная АП.

В результате проведенных исследований выработаны рекомендации построения оптимизационных моделей и показана эффективность проведения параметрического синтеза с помощью пакетов прикладных программ ZEMAX и OPAL, подтверждена сопоставимость полученных результатов расчета по данным программам при соблюдении международной формы записи АП. В качестве возможных областей применения данной схемы можно рекомендовать цифровую фотоаппаратуру, мобильные телефоны, ноутбуки, нетбуки, планшетные компьютеры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Matsusaka K. Konica Minolta Co. Ultracompact optical zoom lens for mobile phone. *Proc. of SPIE*, vol. 6502 650203-1...9.
- [2] Chir-Weei Chang. A compact and cost effective design for cell phone zoom lens. *Proc. of SPIE*, vol. 6667 666700-1...8.
- [3] Lenhardt K. Optics for Digital Photography. *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6834 68340W-1993.
- [4] Hagimori H., Yamamoto Y., Yagyu G., Ishimaru K. *Imaging device and digital camera using the imaging device*. Patent No. US6754446 B2 Minolta Co. Tokyo, Jun. 22, 2004.
- [5] Mihara S., Konishi H., Hanzawa T., Watanabe M., Ishii A., Takeyama T., Imamura A. *Electronic image pickup system*. Patent No. US7436599 B2 Olympus Optical Co. Tokyo, Oct. 14, 2008.
- [6] Mihara S., Imamura A. *Zoom lens and electronic imaging system using the same*. Patent No. US7177094 B2 Olympus Optical Co. Tokyo, Feb. 13, 2007.
- [7] Saory M. *Zoom lens system*. Patent No. US7417800 B2 Hoya Corp., Tokyo, Aug. 26, 2008.
- [8] Mihara S. *Zoom lens and electronic imaging system using the same*. Patent No. US7375902 B2 Olympus Optical Co. Tokyo, May 20, 2008.
- [9] Arai D. *Zoom lens system*. Patent No. US7561342 B2 Nikon Corporation, Tokyo, Jul. 14, 2009.
- [10] Tamura M. *Zoom lens and imaging device*. Patent No. US7327953 B2 Sony Co, Tokyo, Feb. 5, 2008.
- [11] Поспехов В.Г., Дягилева А.В. *Габаритный и абберационный расчет панкратических окуляров*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

- [12] Поспехов В.Г., Дягилева А.В., Мельникова Е.М. Панкратический объектив, включающий группу с заданными свойствами. *Тр. Междунар. конф. «Прикладная оптика 2010»*, т. 1, с. 74–79.
- [13] *ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Version February 22, 2008.* ZEMAX Development Co., 2008, 732 p.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Поспехов В.Г., Крюков А.В. Исследование и расчет малогабаритного панкратического объектива перископического типа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/826.html>

Поспехов Вячеслав Георгиевич родился в 1937 г., окончил МГТУ 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. e-mail: vychprosp@yandex.ru

Крюков Александр Владимирович 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 30 научных работ в области расчета оптических систем. e-mail: alex_krioukov@mail.ru