

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.45

ВЫБОР ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И РАСЧЕТ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ

© 2009 г. И. Г. Бронштейн*; В. А. Зверев*, доктор техн. наук; И. Л. Лившиц*, канд. техн. наук;
Kim Young-Gi**; Kim Tae-Young**; Jung Phil-No**

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

** Samsung Electro-Mechanics Co. Ltd, Suwon, Республика Корея

E-mail: irina@jupiter.spb.ru

Рассмотрены принципиальные вопросы построения оптической схемы малогабаритного объектива, выбора исходной конструкции системы на основе теории синтеза и композиции оптических систем, выполнен анализ проектирования оптических систем малогабаритных объективов для мобильных телефонов. Приведен пример расчета варианта объектива.

Коды OCIS: 220.4830.

Поступила в редакцию 25.12.2008.

Введение

В последние годы появилась потребность в разработке новых типов объективов для камер мобильных телефонов, что, в первую очередь, обусловлено появлением новых приемников излучения с более высокой разрешающей способностью, а также непрерывно растущим спросом на мобильные телефоны со встроенными видеокамерами. Так, например, идет повсеместный переход от объективов для видеокамер 2 М (двух мегапиксельных) к объективам для видеокамер с разрешением 3 М и более.

Разработки подобных оптических систем в настоящее время ведутся во всех странах, производящих мобильные телефоны, лидерами среди которых являются Южная Корея и Япония [1–3]. Все оптические системы, представленные в описаниях патентов, состоят из трех или четырех пластиковых линз с поверхностями несферической формы. Продолжается условное соревнование разработчиков оптических систем по созданию наиболее короткого и достаточно светосильного объектива.

Требуемые в настоящее время объективы должны обладать следующими свойствами и параметрами:

– относительное отверстие объектива должно быть не ниже 1:2.8,

– угловое поле должно быть не менее $2\omega = 60^\circ$,
– размер изображения определяется чувствительной поверхностью ПЗС матрицы $1/4''$, что соответствует размеру диагонали изображения $2y' = 4,5$ мм,

– размер пятна рассеяния в изображении точки, формируемого объективом, должен соответствовать размеру пиксела ПЗС матрицы, не превышающему 2 мкм, в пределах всего поля,

– конструктивные параметры оптической системы объектива должны удовлетворять технологическим условиям массового производства,

– расстояние от первой поверхности оптической системы до плоскости изображения не должно превышать 5 мм,

– для нормального функционирования ПЗС матрицы угол главного луча с оптической осью в пространстве изображений не должен превышать $\omega = 23^\circ$.

Известные конструкции оптических систем малогабаритных объективов

Рассмотрим наиболее известные конструкции малогабаритных оптических систем для мобильных телефонов [1–3]. При проработке патентных источников особый интерес представлял анализ конфигурации оптических элементов, входящих в состав оптических схем объективов.

Результаты анализа представлены в табл. 1. Здесь O – афокальный компонент, оптическая сила которого близка к нулю, P – положительный компонент, имеющий положительную оптическую силу, N – отрицательный компонент, имеющий отрицательную оптическую силу.

Число возможных сочетаний из трех элементов по три равно $3^3 = 27$. Исключив сочетания, не имеющие практического смысла, получаем 19 возможных вариантов схем объектива. Информация, приведенная в табл. 1, позволяет сделать следующие выводы:

- почти все известные из патентных источников оптические схемы малогабаритных объективов состоят из трех оптических элементов (линз),
- каждая из оптических систем содержит хотя бы один оптический элемент с несферическими поверхностями,
- элементы с несферическими поверхностями выполнены из пластика,

– изображения, образованные всеми известными оптическими системами, имеют небольшую дисторсию, не превышающую 3%,

– далеко не все объективы формируют изображение, качество которого определяется дифракцией света.

Примечание: варианты схем оптических систем, обладающих отрицательной оптической силой, при анализе не рассматривались.

Приведенный анализ показывает, что наибольшее количество решений по созданию малогабаритных объективов для камер мобильных телефонов реализовано на базе схемы “ $P-N-P$ ” – два положительных компонента и расположенный между ними отрицательный компонент. Апертурная диафрагма, как правило, располагается после первого компонента, достаточно близко к нему [1–3]. На рис. 1 изображена оптическая схема малогабаритного объектива по патенту США № 6927925 [4].

Таблица 1. Результаты патентного анализа оптических систем малогабаритных объективов

Номер варианта	Положение компонента			Номер патента	Количество патентов для данной конфигурации
	1	2	3		
1	P	N	P	5940219, 6441971, 6624953, 697779, 6724547, 6560043, 6466377	7
2	N	P	N	6028713	1
3	N	N	P	—	—
4	P	P	N	6985307, 6992840, 7046460, 7099092, 7110189	5
5	N	P	P	6639738	1
6	P	N	N	6970306, 6990372	2
7	O	P	P	—	—
8	P	P	O	—	—
9	O	N	P	—	—
10	O	P	N	—	—
11	N	O	P	—	—
12	P	O	N	—	—
13	P	N	O	—	—
14	N	P	O	—	—
15	P	O	P	6147816 зонная пластинка S	1
16	O	O	P	—	—
17	O	P	O	6775072	1
18	P	O	O	—	—
19	P	P	P	5940219, 6804067, 6927925, 6930841, 7072123	5
Общее число проанализированных патентов:					30

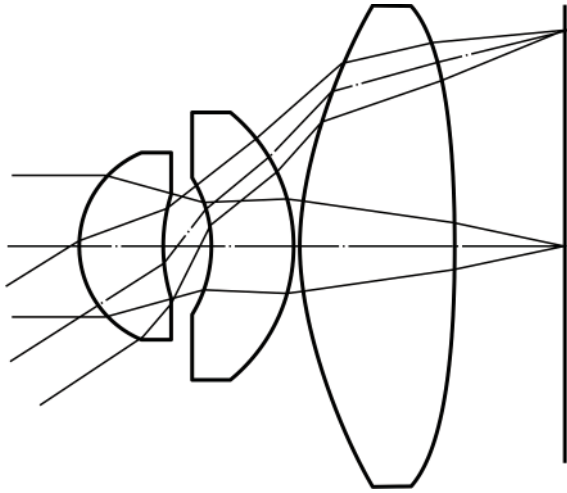


Рис. 1. Пример оптической схемы малоапертурного объектива.

Выбор исходной конструкции оптической системы объектива

Известно, что при умеренных значениях относительного отверстия и углового поля качество изображения, образованное оптической системой, определяется первыми членами разложения в степенной ряд абберации как функции апертурного и полевого углов в изображении точки, т. е. так называемыми первичными абберациями изображения. Следовательно, при любой оптической системе при оптимизации ее параметров по критерию качества образованного изображения необходимо компенсировать прежде всего первичные абберации.

Первичные абберации определяются коэффициентами:

– сферическая абберация

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=k} h_i Q_i, \quad (1)$$

– кома

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{i=k} H_i Q_i - J \sum_{i=1}^{i=k} W_i, \quad (2)$$

– астигматизм

$$S_{III} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{H_i^2}{h_i} Q_i - 2J \sum_{i=1}^{i=k} \frac{H_i^2}{h_i} W_i + J^2 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i}, \quad (3)$$

– пецвалева кривизна поверхности изображения

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i}, \quad (4)$$

– дисторсия

$$S_V = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{H_i^3}{h_i^2} Q_i - 3J \sum_{i=1}^{i=k} \frac{H_i^2}{h_i^2} W_i + J^2 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{H_i}{h_i^2} [3(v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i) + (v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i)] - J^3 \sum_{i=1}^{i=k} \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{h_i^2}, \quad (5)$$

где $Q_i = P_i + T_i \sigma_i$,

$$W_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i),$$

$$P_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} W_i,$$

$$T_i = \frac{(n_{i+1} v_{i+1} - n_i \alpha_i)^3}{(n_{i+1} - n_i)^2},$$

σ_i – коэффициент деформации сферической поверхности в уравнении $x^2 + y^2 - 2rz - (1 + \sigma_i)z^2$, α_i – угол, образованный осевым виртуальным лучом с оптической осью, $v_i = 1/n_i$, h_i , H_i – расстояния от оптической оси до точек пересечения осевого и главного виртуальных лучей с главными плоскостями оптических поверхностей, J – инвариант Лагранжа–Гельмгольца.

В том случае, когда оптическая система представляет собой тонкий компонент [5], т. е. когда толщиной составляющих его линз можно пренебречь, высоты виртуальных лучей на главных плоскостях поверхностей

$$h_1 = h_2 = \dots = h_k = h,$$

$$H_1 = H_2 = \dots = H_k = H, \quad (6)$$

при этом

$$\sum_{i=1}^{i=k} h_i Q_i = h \sum_{i=1}^{i=k} Q_i, \quad \sum_{i=1}^{i=k} H_i Q_i = H \sum_{i=1}^{i=k} Q_i.$$

Если в разработанной оптической системе

$\sum_{i=1}^{i=k} Q_i = 0$, то $S_I = 0$. При этом, если $\sum_{i=1}^{i=k} W_i = 0$,

то и коэффициент $S_{II} = 0$ при неравных нулю остальных коэффициентах.

Таким образом, в образованном тонким компонентом изображении независимо от количе-

ства в нем несферических поверхностей можно получить лишь апланатическую коррекцию первичных аберраций [6].

Для компенсации всех первичных аберраций изображения необходимо разнести поверхности системы вдоль оптической оси таким образом, чтобы высоты $h_i \neq h_j$, $h_{\mu} \neq h_{\nu}$. Естественным образом условия неравенства высот достигаются в зеркальных оптических системах. Так, например, в трехзеркальной системе при конечном расстоянии между отражающими поверхностями вполне можно достичь плананастигматической коррекции аберраций [7, 8].

В традиционных системах при малой, но конечной толщине линз неравенство высот можно получить путем увеличения кривизны поверхностей. Однако это приводит к появлению больших трудноустраняемых аберраций высшего порядка. Этим объясняется тот факт, что в традиционных оптических системах замена сферических поверхностей несферическими не всегда приводит к желаемому (или ожидаемому) эффекту.

Пусть при неравных высотах точек пересечения виртуальных лучей с главными плоскостями поверхностей параметры $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_k = 0$. Каждая из поверхностей такой системы, по сути дела, образует изображение, в котором отсутствует сферическая аберрация. Т. е. в общем случае при неравенстве нулю других коэффициентов для каждой поверхности, коэффициент $S_1 = 0$. Такие поверхности профессор В.Н. Чуриловский называл анаберрационными [9]. Примером таких систем, составленных из анаберрационных поверхностей, могут служить классические зеркальные системы Ньютона, Кассегрена и Грегори, достаточно широко применявшиеся в прошлом столетии благодаря сравнительной простоте контроля формы поверхностей в процессе изготовления. Образованное ими изображение имеет приемлемое качество лишь в пределах весьма малого углового поля, для расширения которого используются линзовые компенсаторы полевых аберраций.

В оптических системах малогабаритных объективов толщина линз не может считаться малой по сравнению с длиной системы из-за технологических проблем изготовления. Поэтому различие высот точек пересечения виртуальных лучей с главными плоскостями поверхностей системы так же, как и в зеркальных системах, получается естественным образом. При этом поверхности линз таких объективов (по крайней мере, достаточное число их) не должны быть анаберрацион-

ными. С другой стороны, из-за технологических проблем изготовления и во избежание появления больших аберраций высшего порядка коэффициенты деформации поверхностей не должны быть большими, а следовательно, уже в исходной системе должны быть достаточно малыми параметры P_i поверхностей.

Удачный выбор исходной оптической системы определяет конечный успех ее создания. Эту задачу удается успешно решить благодаря применению теории синтеза и композиции оптических систем, предложенной и разработанной профессором М.М. Русиновым [10], получившей свое дальнейшее развитие в работах [11, 12].

Разработка конструкции исходной оптической системы малогабаритного объектива

В процессе разработки оптической системы малогабаритного объектива можно выделить три основных этапа:

- выбор исходной оптической системы,
- габаритный расчет оптической системы, выполняемый одновременно с ее параметрическим синтезом,
- оптимизация параметров оптической системы по критерию качества изображения. Этот этап разработки оптической системы, по сути дела, сводится к автоматизированной коррекции аберраций изображения, образованного рассчитываемой системой.

Рассмотрим содержание каждого из этапов проектирования.

Этап 1. В соответствии с классификацией объективов, предложенной в работах [11, 12], оптическая система требуемого объектива имеет индекс сложности, равный 7. Формула структурного синтеза такой системы имеет вид

$$B(PA) + K(PP) + K(II),$$

где условно обозначены B – базовый элемент, P – поверхность, концентричная центру входного зрачка, A – апланатическая поверхность, K – коррекционный элемент, I – близфокальная поверхность.

Подробное описание свойств поверхностей и их применения приведены в работе [11].

Этап 2. Качество изображения, образованного оптической системой, должно соответствовать структуре многоэлементного приемника оптического излучения. Для приемника излучения при дискретной структуре чувствительной поверхности требование к качеству изображения

принято определять требуемым контрастом при конкретной пространственной частоте предмета. В качестве такой частоты, как правило, принимают частоту Найквиста.

При длине диагонали используемой в рассматриваемом случае ПЗС матрицы в $1/4''$, равной 4,5 мм, и соотношении длин сторон ее поверхности, равном 4:3, длина стороны чувствительной поверхности по горизонтали – $a = 3,6$ мм и по вертикали – $b = 2,7$ мм. Число пикселей в высококачественной матрице по горизонтали – 2048 мм, а по вертикали – 1536. Отсюда находим расстояние между пикселями

$$\Delta = a/2048 = b/1536 = 0,00175 \text{ мм или } 1,75 \text{ мкм.}$$

При этом количество пикселей на миллиметр

$$p = 1/\Delta = 2048/a = 1536/b = 569 \text{ пикс/мм.}$$

Частота Найквиста $N = (1/2p) = 284$ лин/мм.

Заметим, что предельная частота спектра пространственных частот, пропускаемых оптической системой при дифракционном качестве изображения, равна $N_0 \approx D/(\lambda f')$. При относительном отверстии 1:2,8 и длине волны 0,587 мкм, частота $N_0 \approx 600$ лин/мм. При линейном поле изображения, равном 4,5 мм, и угловом поле объектива, принятом 65° , фокусное расстояние объектива $f' = 3,57$. При заданном относительном отверстии разрабатываемой оптической системы, при компромиссно выбранном угловом поле предмета и соответственно найденном значении фокусного расстояния системы, при выбранной из условия требуемой коррекции aberrаций формуле структурного синтеза, находим радиусы кривизны сферических поверхностей, толщины линз и воздушных промежутков, т. е. параллельно с решением задачи габаритных ограничений, решаем задачу параметрического синтеза исходной оптической системы. При этом следует учесть плоскопараллельную пластинку как необходимый элемент приемника излучения, поскольку она расположена в сходящемся пучке лучей и вносит aberrации в изображение. Без учета ее влияния достичь дифракционного качества изображения невозможно. Заметим, что выбор толщин линз удобно выполнять с помощью графического редактора используемой программы.

Этап 3. Проблема коррекции aberrаций изображения предполагает решение многопараметрической задачи взаимной компенсации сугубо нелинейных функций. Подобные задачи строго аналитического решения, как правило, не имеют. Поэтому процедура автоматизиро-

ванной коррекции aberrаций изображения, образованного рассчитываемой оптической системой, включают в себя, по сути дела, две взаимосвязанные процедуры: автоматическую коррекцию aberrаций изображения с помощью соответствующего программного обеспечения и эвристическую процедуру управления процессом автоматической коррекции aberrаций, и соответственно, процессом автоматического расчета оптической системы.

На этом этапе интеллектуальный вклад разработчика оптической системы заключается в грамотном, можно даже сказать, в удачном, построении оценочной функции с последующим управлением процессом оптимизации параметров системы путем изменения как оценочной функции за счет назначения различных весовых характеристик, так и введением и изменением весовых характеристик на параметры оптической системы. При выполнении этого этапа проектирования оптической системы квалификация и опыт разработчика не менее важны, чем при выборе исходной системы.

В рассматриваемой оптической системе основными коррекционными параметрами являются коэффициенты уравнений, описывающих несферические поверхности. При этом важно иметь в виду, что вид уравнения, описывающего несферическую поверхность, оказывает существенное влияние на характер коррекции aberrаций. При выполнении расчета оптической системы, параметры которой приведены в данной работе в качестве примера, несферические поверхности определены уравнением вида

$$z = G_1 R^2 + G_3 R^4 + G_6 R^6 + G_{10} R^8 + G_{16} R^{10}. \quad (7)$$

В качестве коррекционных параметров использовались коэффициенты уравнений несферических поверхностей: $G_1, G_3, G_6, G_{10}, G_{16}$.

При расчете и дальнейшей оптимизации параметров рассматриваемой оптической системы перед авторами возникли следующие серьезные проблемы:

- необходимость коррекции хроматических aberrаций при отсутствии выбора материала линз,
- серьезные противоречия, возникающие при необходимости коррекции дисторсии с одновременным достижением необходимых габаритов оптической системы (длина объектива не должна превосходить его фокусное расстояние более, чем в 1,2 раза),
- обеспечение требуемых значений углов падения главных лучей на приемник изображения,

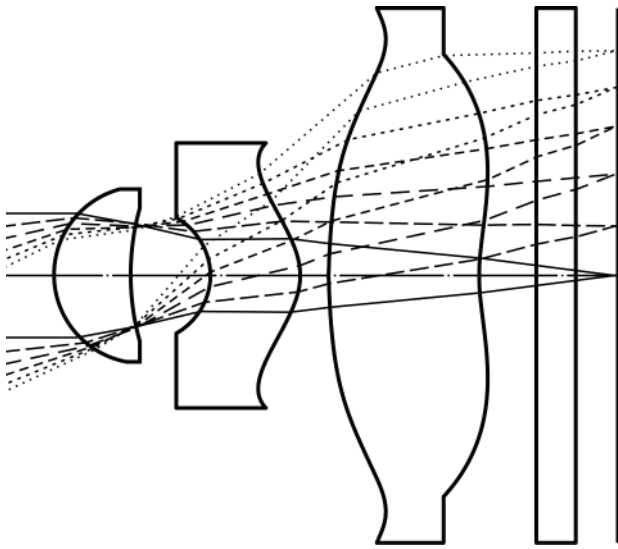


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема начального варианта объектива.

которые также вступают в конфликт с коррекцией дисторсии,

- требования к допустимым отклонениям формы поверхностей и толщины оптических деталей при их изготовлении, обусловленные условиями массового производства.

Следует особо подчеркнуть весьма нелинейный характер взаимосвязи параметров, определяющих aberrации изображения, образованного подобными системами. Это приводит к тому, что при оптимизации параметров значения коэффициентов уравнений, определяющих несферические поверхности, принимают весьма большие значения, что затрудняет сходимость процесса автоматизированной коррекции aberrаций. Необходимость разработки сложных оптических систем подобного вида определяет повышенные требования как к уровню используемого программного продукта, так и к квалификации разработчика.

На рис. 2 представлена оптическая схема исходной системы, полученная в результате ее параметрического синтеза из поверхностей с известными свойствами. Начальные aberrации системы невелики.

Поскольку в результате параметрического синтеза получаем оптическую систему, содержащую только сферические поверхности, процесс синтеза начальной системы выполняем при более низком относительном отверстии. Пусть, например, начальная предельная пространственная частота изображаемого предмета при безaberrационном изображении равна $N_0 = 200$ лин/мм. Тогда в со-

ответствии с формулой $N_0 \approx D/(\lambda f')$ получаем, что при $\lambda = 0,587$ мкм относительное отверстие оптической системы должно быть равно $D/f' = 1;8,5$. В рассматриваемом случае процесс синтеза начальной системы был выполнен при $D/f' = 1;8,5$.

В результате автоматизированной коррекции aberrаций получена оптическая система объектива, схема которой представлена на рис. 3. В табл. 2 приведены частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) для разработанного малогабаритного объектива. Сравнение приведенных значений со значениями идеальных ЧКХ также приведенные в табл. 2, позволяет сделать вывод о том, что разработанная по изложенной методике оптическая система формирует изображение высокого качества, близкого к дифракционному пределу разрешения по всему полю изображения.

Чрезвычайная актуальность проблемы поиска более совершенной конструкции оптической системы, обладающей более высокими оптическими характеристиками при уменьшенных

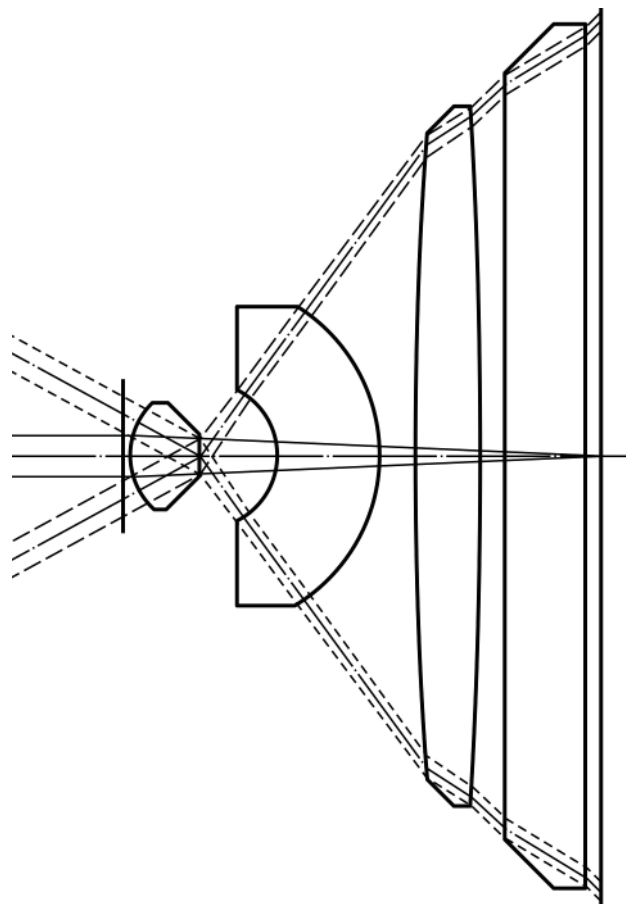


Рис. 3. Оптическая схема варианта объектива для мобильного телефона после оптимизации.

Таблица 2. Частотно-контрастные характеристики объектива, представленного на рис. 3

№ поз.	Частота лин/мм	Контраст				
		Точка на оси	Полное угловое поле 30 угловых градусов		Полное угловое поле 65 угловых градусов	
			меридиональное сечение	сагиттальное сечение	меридиональное сечение	сагиттальное сечение
1	0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	10,00	0,978	0,970	0,975	0,947	0,974
3	20,00	0,947	0,922	0,931	0,900	0,937
4	30,00	0,919	0,870	0,884	0,861	0,899
5	40,00	0,885	0,813	0,830	0,759	0,856
6	50,00	0,853	0,757	0,771	0,662	0,811
7	60,00	0,815	0,704	0,713	0,569	0,764
8	70,00	0,780	0,655	0,660	0,491	0,724
9	80,00	0,747	0,608	0,601	0,423	0,678
10	90,00	0,712	0,572	0,553	0,368	0,642
11	100,00	0,675	0,535	0,505	0,322	0,601
12	110,00	0,645	0,504	0,463	0,288	0,567
13	120,00	0,613	0,475	0,426	0,260	0,534
14	130,00	0,585	0,450	0,393	0,239	0,505
15	140,00	0,555	0,423	0,361	0,221	0,476
16	150,00	0,529	0,399	0,335	0,206	0,451
17	160,00	0,505	0,379	0,309	0,196	0,424
18	170,00	0,477	0,356	0,292	0,185	0,404
19	180,00	0,457	0,338	0,273	0,178	0,384
20	190,00	0,438	0,320	0,256	0,171	0,364
21	200,00	0,417	0,303	0,241	0,164	0,347

габаритах и количестве компонентов, определяется массовым характером потребности в мобильных телефонах со встроенными видекамерами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shinohara Y.* Imaging lens. USA. Patent N US 6,795,253 B2, 2004.
2. *Isono M.* Imaging lens. USA. Patent N US 2004/0021957 A1, 2004.
3. *Sato K.* Imaging lens. USA. Patent N US 6,961,191 B2, 2005.
4. *Зверев В.А.* Основы геометрической оптики. Учебное пособие. СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
5. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
6. *Зверев В.А., Шепелевич А.Н.* Понятие тонкого компонента в системе отражающих поверхностей // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 21–26.
7. *Зверев В.А., Шепелевич А.Н.* Параметрическая модель трехкомпонентной системы отражающих поверхностей // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 4. С. 47–50.
8. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 563 с.
9. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
10. *Anitropova I.L.* Formalizing the heuristic synthesis procedure in lens design // OSA Proc. Of the International Optical Design Conference, USA, 1994. V. 22. P. 6–10.
11. *Livshits I.L., Salnikov A.V.* CAD based on developed algorithm and expert rules in proposed in automate lens // Technical Digest ICO, USA, 2004. V. 4228. P. 157–158.
12. *Nyquist H.* Certain topics in telegraph transmission theory // AIEE. 1962. V. 47. P. 617–644.