

УДК 681.5:681.7.067.2

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАСЧЕТА МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. Г. Бронштейн,

директор

Центр оптико-информационных технологий и систем

И. Л. Лившиц,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Унчун Чо,

профессор

Корейский политехнический университет

Приводится один из подходов к созданию малогабаритного объектива для широкого класса оптико-информационных систем, основанный на выборе стартовой точки оптической системы с применением теории синтеза и композиции оптических систем из элементов с известными свойствами.

This paper presents an approach to the design of small-size lens for television information systems. The proposed approach employs the theory of optical system composition and synthesis for the starting point selection that utilizes elements with the well known optical properties.

Введение

В настоящее время в глобально распределенных информационно-управляющих системах все чаще в обратной связи используется видеоканал. На ранних этапах развития таких систем видеoinформация являлась вспомогательной. Однако развитие коммуникаций, увеличение производительности модулей таких систем, появление специализированных сигнальных процессоров обработки видеoinформации вывели видеоданные в группу основных, а модули систем – в класс встраиваемых [1]. Это характерно для современных систем превентивной безопасности, систем управления производственными процессами, систем управления малогабаритными подвижными объектами и др.

С увеличением роли видеoinформации в работе таких систем задача повышения качества видеоданных стала приоритетной, что в свою очередь стимулирует разработку малогабаритных приемников излучения повышенного разрешения и новых типов оптических компонентов для них.

Примером таких разработок для массового использования является создание объективов для камер мобильных телефонов, смартфонов, ноутбуков. Это связано, в первую очередь, с появлением новых типов цифровых приемников, а также с возросшим спросом на подобные цифровые устройства со встроенными видеокамерами.

Разработки оптических систем для указанных и подобных им систем в настоящее время ведутся во всех странах. Однако лидерство остается за Японией и Южной Кореей [2–4]. Все представленные в описаниях патентов оптические системы состоят из трех или четырех пластиковых асферических линз. Продолжается условное соревнование разработчиков за создание наиболее короткого и достаточно светосильного объектива.

Требования к объективам нового поколения

Объективы нового поколения должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- относительное отверстие не менее 1:2,8;
- угловое поле не менее $2\omega = 60^\circ$;
- размер изображения должен подходить для ПЗС-матрицы размером j'' , что соответствует размеру диагонали изображения $2y' = 4,5$ мм;
- качество изображения, формируемое объективом, должно разрешать элементы ПЗС-матрицы (пиксели) размером не более 2 мкм;
- число пикселей на светочувствительном элементе составляет 2048×1536 ;
- продольные габариты оптической системы (длина вдоль оси) не должны превышать 5 мм;
- по условиям эксплуатации ПЗС-матрицы оговаривается выходной угол ω главного луча с оптической осью, который не должен превышать 27° ;
- количество элементов оптической системы должно быть минимальным.

При выборе материала и формы оптических элементов следует руководствоваться тем, что оптическая система должна быть воспроизводима в условиях массового производства.

Этапы разработки

В настоящей работе предлагается решение задачи по разработке объектива с перечисленными выше параметрами с явным выделением трех этапов проектирования.

1. Выбор стартовой точки на основе теории композиции оптических систем, предложенной профессором М. М. Русиновым [5], а также ее развития, представленного в работах [6, 7].

2. Габаритный расчет системы, выполняемый одновременно с ее параметрическим синтезом.

3. Автоматическая коррекция объектива с применением программного обеспечения SYNOPSYS [8].

Этап 1. В соответствии с классификацией объективов, предложенной в работе [6], требуемая оптическая система имеет индекс сложности 6.

Формула структурного синтеза

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

где B — базовый элемент; P — поверхность, концентричная центру входного зрачка; A — апланатическая поверхность; K — коррекционный элемент; I — близфокальная поверхность.

Подробные описания действия поверхностей с известными свойствами приведены в работе [6].

Этап 2. Для определения требуемого качества оптической системы, которое должно соответствовать параметрам приемника изображения, проведем расчет числа Найквиста согласно теории, изложенной в работе [9]. Каждому приемнику можно сопоставить определенную частоту пропускания пространственных частот. При этом предельной частотой пропускания будет являться частота Найквиста. Для ПЗС-матрицы с размером пикселя 2 мкм это будет соответствовать расстоянию между пикселями, которое обозначим $\Delta = 2 \cdot 10^{-3}$. Тогда

количество пикселей на 1 мм будет $p_{\text{намм}} = 1/\Delta = 500$ пикс/мм, и частота Найквиста N , равная половине этой величины, составит 250 лин/мм.

В рамках габаритного расчета вычислим размеры приемной площадки ПЗС-матрицы по горизонтали и вертикали по известному количеству элементов приемника (2048×1536): 2,6 мм по вертикали и 3,6 мм по горизонтали. Отсюда получаем диагональ матрицы, которая должна соответствовать размеру изображения, даваемого оптической системой, 4,44 мм.

При параметрическом синтезе объектива выбор толщин производится с использованием графического редактора программы SYNOPSYS.

При расчетах оптической системы следует ввести в оптическую схему и элемент приемника — плоскопараллельную пластинку, поскольку она располагается в сходящемся пучке лучей и влияет на аберрации. Пренебрегать ее влиянием в дифракционно-ограниченной системе нельзя.

Этап 3. Автоматизированная коррекция производится с использованием программы SYNOPSYS. На этом этапе интеллектуальный вклад разработчика заключается:

- в грамотном построении оценочной функции;
- в управлении процессом оптимизации за счет введения различных весовых характеристик как на функции, так и на параметры системы.

Этот этап почти так же сложен, как и этап выбора стартовой точки. В предлагаемой схеме основными параметрами являлись коэффициенты асферических поверхностей, которые описываются следующим уравнением:

$$\begin{aligned} Z = & G(1)R^2 + G(2)Y + G(3)R^4 + G(4)R^{2Y} + G(5)Y^2 + \\ & + G(6)R^6 + G(7)R^{4Y} + G(8)^{R2Y*2} + G(9)Y^3 + \\ & + G(10)R^8 + G(11)X + G(12)R^{2X} + G(13)R^{4X} + \\ & + G(14)X^3 + G(15)XY + G(16)R^{10} + G(17). \end{aligned}$$

При оптимизации использованы коэффициенты: $G(3)$, $G(6)$, $G(10)$, $G(16)$.

Результат разработки

Оптическая схема стартовой точки и графики ее остаточных аберраций представлены на рис. 1 (см. 3-ю сторону обложки). Все поверхности — сферические.

На рисунке видно, что начальные остаточные аберрации стартовой точки объектива невелики.

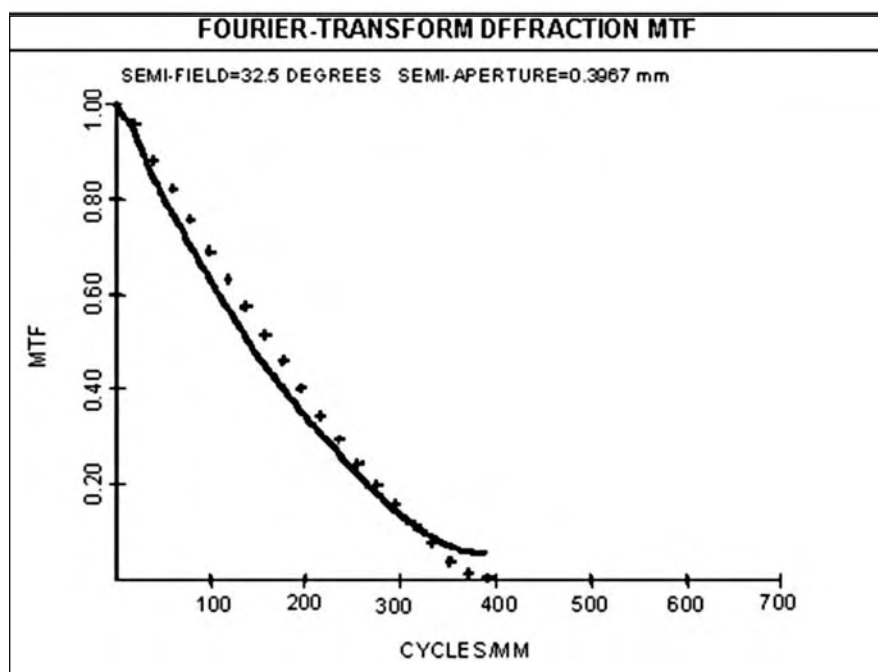
В табл. 1 представлены параметры приведенной стартовой точки, полученные при использовании программы SYNOPSYS, а в табл. 2 — ее технические характеристики. Следует отметить, что на этапе выбора стартовой точки при переходе к параметрическому синтезу объектива допускается снижение некоторых технических характеристик системы. В нашем случае, например, — величина относительного отверстия, которая затем (на этапе оптимизации) восстанавливается до требуемого значения.

■ Таблица 1. Параметры стартовой точки оптической системы

Поверхность	Радиус	Толщина	Среда	Показатель преломления	Коэффициент дисперсии
0	Бесконечность				
1	0,5192	0,5192	Акрил	1,49167	55,31
2	0,75622	0,56428	Воздух	1	
3	-0,56428	0,75622	Поликарбонат	1,58547	29,91
4	-1,3205	0,3	Воздух	1	
5	60,49737	0,45373	Акрил	1,49167	55,31
6	-60,49737	0,18	Воздух	1	
7	Плоскость	0,6	К8	1,51683	63,87
8	Плоскость	0,0686	Воздух	1	

■ Таблица 2. Технические характеристики стартовой точки оптической системы

Техническая характеристика	Значение характеристики
Расстояние до объекта	Бесконечность
Угловое поле, угл. град	65
Фокусное расстояние, мм	3,8
Относительное отверстие	1:8,3
Полная длина системы, мм	3,37
Задний фокальный отрезок, мм	0,07
Размер изображения в плоскости Гаусса, мм	2,4
Спектральный диапазон, мкм	0,656–0,486
Основная длина волны, мкм	0,587
Положение апертурной диафрагмы	После 2-й поверхности



■ Рис. 3. Частотно-контрастные характеристики для объектива после оптимизации

Результатом автоматизированной коррекции является объектив, показанный на рис. 2 (см. 3-ю сторону обложки), где также приведены его остаточные поперечные аберрации. На рис. 3 представлены частотно-контрастные характеристики разработанного объектива, которые позволяют сделать вывод о достижении высокого качества изображения, близкого к дифракционному пределу по всему полю изображения. Объектив отличается хорошим исправлением дисторсии, которая не превышает 1 % для углового поля $2\omega = 65^\circ$.

Заключение

Следует отметить, что направление работ, связанных с расчетом подобных объективов, является чрезвычайно актуальным и, очевидно, ориентировано на дальнейшее совершенствование их схем с целью достижения более высоких оптических характеристик с одновременным уменьшением габаритов и количества компонентов.

Работа выполнена в рамках международного контракта между СПб ГОУ ИТМО и Корейским политехническим университетом при поддержке гранта Корейского исследовательского фонда, основанного корейским правительством (MOEHRD) KRF-2006-613-C00002.

Литература

1. Сергеев М. Б., Чудиновский Ю. Г. IP-сеть как основа построения распределенных информационно-управляющих систем // Информационно-управляющие системы для подвижных объектов. СПб.: Политехника, 2002. С. 33–42.
2. Yoshikazu Shinohara. Patent N US 6,795,253 B2, Date of Patent Sept. 21, 2004.
3. Masashi Isono. US Patent Application Publication, pub. N US 2004/0021957 A1, Pub. Date Feb. 5, 2004.
4. Kenichi Sato. Patent N US 6,961,191 B2, Date of Patent Nov. 1, 2005.
5. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979.
6. Anitropova I. L. Formalizing the heuristic synthesis procedure in lens design // OSA Proc. of the International Optical Design Conference. Rochester, USA. June 1994.
7. Livshits I., Salnikov A. CAD based on developed algorithm and expert rules in proposed in automate lens // Proc. 4th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, ODF'04. Makuhari, Chiba, Japan. July 2004.
8. SYNOPSIS. V12039. USA. OSD Inc., 2007.
9. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Trans. AIEE. Apr. 1928. Vol. 47. P. 617–644.

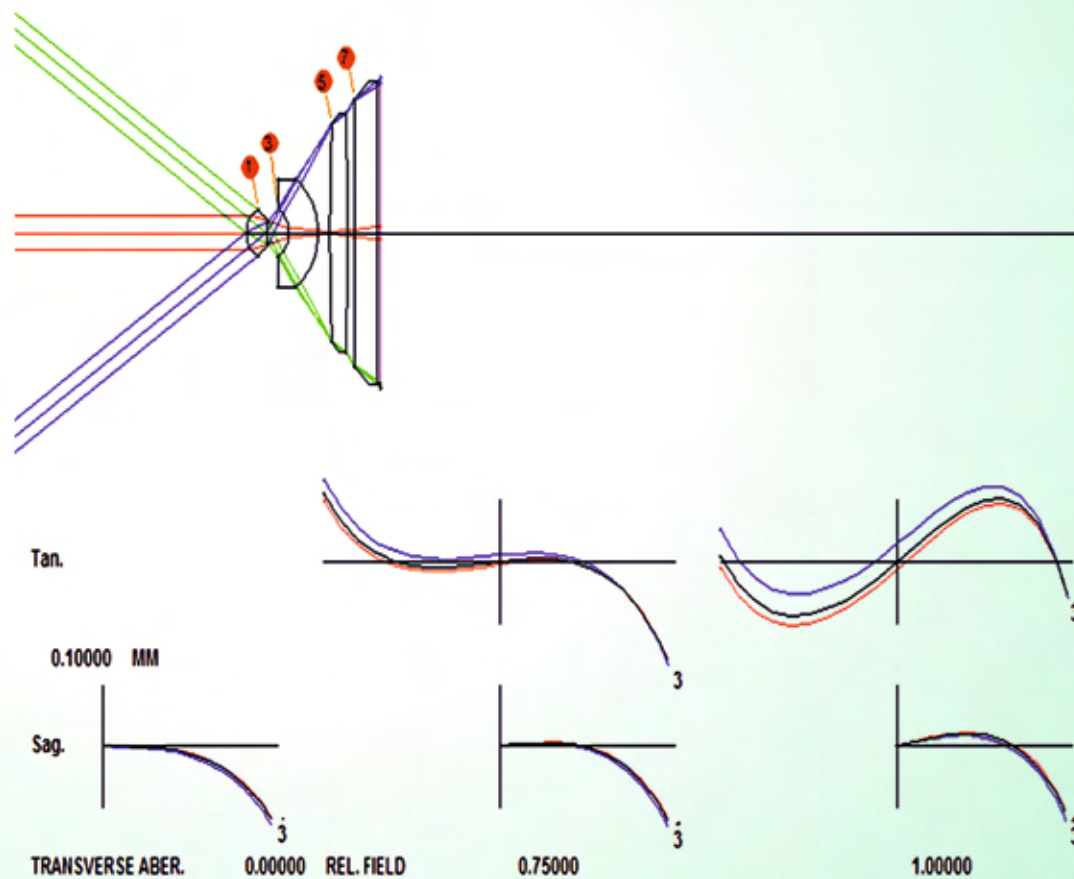


Рис. 1. Оптическая схема и графики поперечных aberrаций для объектива

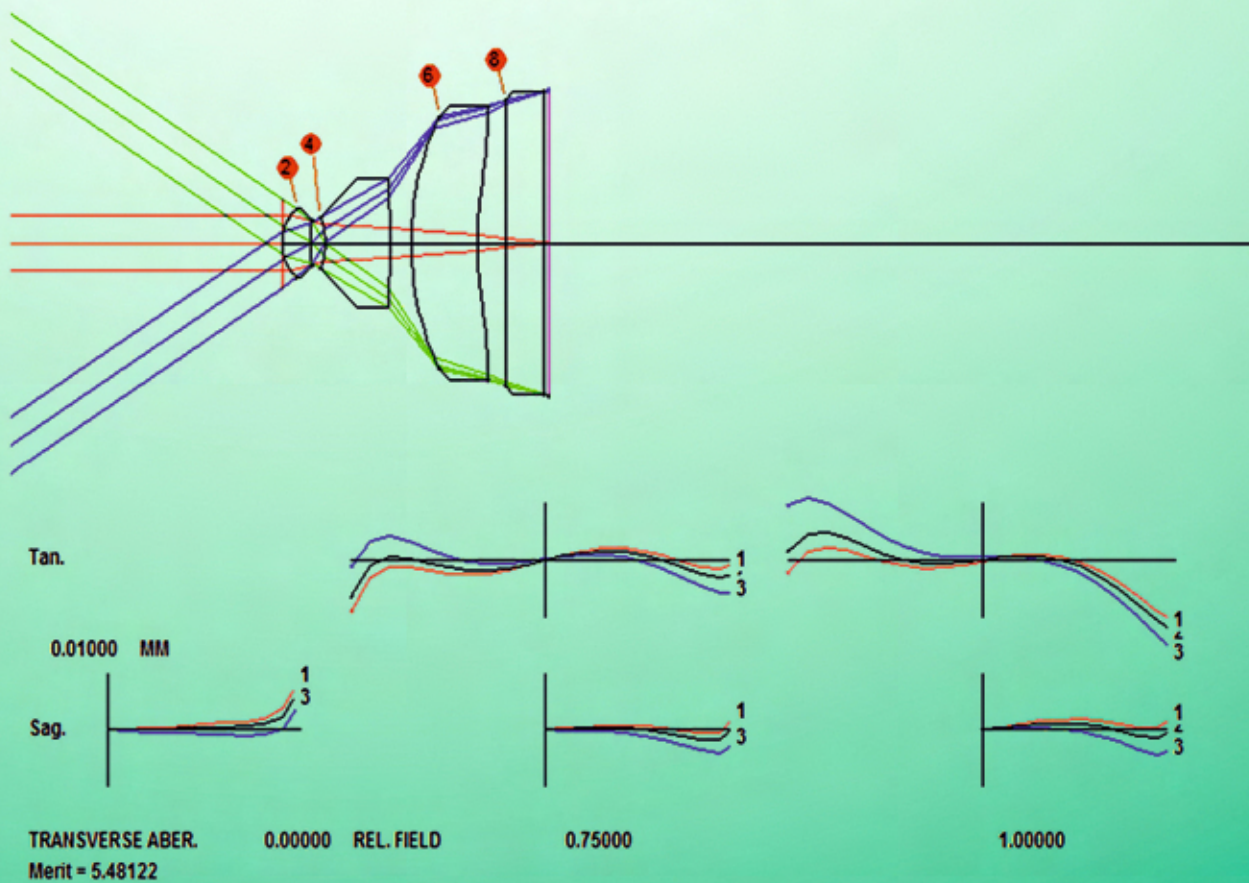


Рис. 2. Объектив и графики его остаточных aberrаций после оптимизации