

УДК 535.317.2

Структурно-габаритный синтез исходных схем оптических систем

© 2019 г. **С. Н. Бездидько***, доктор техн. наук; **А. Ф. Ширанков****, канд. техн. наук**Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск Московской области****Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва**E-mail: ashirankov@mail.ru**Поступила в редакцию 04.03.2019*

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-09-17-24

Рассмотрен первый и определяющий этап проектирования оптических систем — структурно-габаритный синтез исходных схем оптических систем. Поиск структуры и габаритных параметров исходной схемы оптической системы проводится на основе гауссовой оптики и теории аберраций. Введены необходимые условия на параметры схемы, при выполнении которых она удовлетворяет требованиям технического задания и является решением задачи синтеза. Для выбора наилучшего решения введен ряд критериев и целевая функция. Приведены примеры синтеза структурно-габаритных схем двух вариообъективов. Рассмотрена формализация синтеза исходной схемы оптических систем.

Ключевые слова: оптическая система, структурно-габаритный синтез, исходная схема.

Код OCIS: 220.4830

Разработка (синтез) оптических систем (ОС) с необходимыми габаритными, светотехническими, аберрационными, технологическими, эксплуатационными и стоимостными параметрами в общем случае (при разработке ОС с высокими параметрами) является крайне сложной и до конца нерешенной задачей.

Важно отметить, что анализ существующего российского и зарубежного программного обеспечения (ПО) и комплексов «автоматизированного» проектирования ОС показывает, что в них отсутствует первый этап синтеза ОС — этап синтеза их исходной структурной схемы с известными габаритными параметрами. Предполагается, что исходная ОС уже существует (взята из архива ОС или патентов) или разработчик каким-либо способом создает ее самостоятельно. Фактически этот этап проводится «вручную». Именно это обстоятельство не позволяет назвать эти комплексы «автоматическими».

Поэтому разработка ОС до настоящего времени остается больше искусством, чем наукой. Это приводит к завышенным срокам проектирования ОС и не всегда позволяет найти оптимальное решение (наиболее простую и технологичную конструк-

цию ОС), которое удовлетворяет техническому заданию (ТЗ).

Сейчас синтез ОС в основном проводится одним из трех способов: поиск и выбор ближайшей ОС из архива, построение ОС путем подбора базовых элементов с известными оптическими свойствами (метод М.М. Русинова), синтез на базе гауссовой оптики и классической теории аберраций.

Остановимся на третьем способе — синтезе ОС на основе гауссовой (параксиальной) оптики и классической теории аберраций.

Развитие теории и методов проектирования ОС этим способом позволило выделить его наиболее значимые этапы: структурно-габаритный синтез структуры и габаритных параметров исходной схемы ОС, определение требований к аберрационным параметрам отдельных ее компонентов, построение конструкции отдельных компонентов системы реальной толщины с необходимыми коррекционными возможностями, сборка всей системы и оптимизация полученной исходной схемы ОС.

Этот способ синтеза позволяет на основе требований ТЗ построить исходную схему ОС, конструкция которой является хорошим решением для

дальнейшей параметрической оптимизации. При этом структура ОС считается найденной и уже не изменяется. Причем именно этап синтеза исходной схемы ОС часто является определяющим для общего успеха синтеза. Поэтому более детально остановимся на 1-ом этапе синтеза классических ОС – структурно-габаритном синтезе.

Постановка задачи на этапе структурно-габаритного синтеза исходной схемы формулируется следующим образом. По исходным данным ТЗ найти оптимальную структуру ОС (из тонких компонентов): число и оптические силы компонентов, расстояния между их главными плоскостями, положение и размер апертурной диафрагмы (АД), входного и выходного зрачков и др.

Исходными данными по ТЗ являются: назначение ОС, характеристики предмета и приемника излучения, фокусное расстояние, рабочее поле, параметры АД и проч.

Рассмотрим используемую математическую модель структурно-габаритной схемы ОС — конструктивную модель габаритной схемы из тонких компонентов, математический аппарат, основные характеристики и критерии рационального построения габаритных схем, а также целевую функцию этапа.

Математическая модель структурной схемы ОС представляет собой математическое описание (уравнения и неравенства) параметров габаритной схемы на основе аппарата гауссовой оптики с указанием необходимых ограничений, разделением параметров на входные (известные) и выходные (неизвестные) и указанием диапазонов их возможного изменения.

Для ОС с постоянными характеристиками используется общепринятое описание конструктивных параметров габаритной схемы с тонкими компонентами: число компонентов p , оптические силы компонентов φ_i ($i = 1, 2, \dots, p$), расстояния между компонентами d_i , номер компонента до диафрагмы p_g , расстояние d_g от него до диафрагмы.

Условие физической реализуемости $d_j \geq \varepsilon_j$, где ε_j — малая линейная величина.

Удобным инструментом для решения оптических задач в области параксиальной оптики являются широко известные матричные методы [1, 2], а также формализм скобок Гаусса [3].

Как известно, формулы для расчета параксиального луча через ОС из тонких компонентов имеют вид

$$\begin{cases} \alpha_{i+1} = \alpha_i + h_i \varphi_i \\ h_{i+1} = h_i - d_i \alpha_i \end{cases}, \quad (1)$$

где h_i — высота параксиального луча на i -ом компоненте, φ_i — оптическая сила i -го компонента, d_i — расстояние между компонентами, α_i — угол луча с оптической осью в пространстве между $(i - 1)$ -ым и i -ым компонентами.

Приведенные соотношения используются при расчете хода параксиального луча через ОС в тонкокомпонентном приближении. Указанные соотношения удобны для компьютерной реализации и дают возможность по начальным координатам произвольного параксиального луча (α_0, h_0) вычислять координаты параксиального луча после прохождения произвольного компонента и на выходе всей системы.

Однако эти соотношения не позволяют изучать общие свойства ОС и разрабатывать конструктивные методы анализа и синтеза габаритных схем. Для проведения этапов анализа, синтеза и построения математической модели наиболее удобно представление хода параксиального луча в аналитическом виде с использованием матричных методов и аппарата скобок Гаусса. В этом случае соотношение (1) можно представить в виде произведения следующих матриц

$$\begin{pmatrix} \alpha_{i+1} \\ h_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -d_i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \varphi_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ h_i \end{pmatrix},$$

$$\text{или} \quad \mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{D}_i \Phi_i \mathbf{X}_i, \quad (2)$$

где Φ_i — матрица преломления, \mathbf{D}_i — матрица перемещения (переноса), \mathbf{X}_i — вектор координат параксиального луча.

Преобразование координат параксиальных лучей от входной до выходной плоскости при прохождении через ОС из p компонентов запишем с помощью матрицы действия \mathbf{M}_p , равной произведению матриц \mathbf{D}_i, Φ_i ,

$$\mathbf{X}_{p+1} = \mathbf{D}_p \Phi_p \mathbf{D}_{p-1} \dots \mathbf{D}_1 \Phi_1 \mathbf{D}_0 \mathbf{X}_0 = \mathbf{M}_p \mathbf{X}_0,$$

$$\mathbf{D}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -d_0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D}_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -d_p & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_p = \begin{pmatrix} m_{11}^p & m_{12}^p \\ m_{21}^p & m_{22}^p \end{pmatrix},$$

где d_0 — расстояние от первого компонента до входной плоскости, d_p — расстояние от последнего компонента до выходной плоскости.

При совпадении входной и выходной плоскостей с плоскостями предмета и изображения для d_0 и d_p имеем: $d_0 = -s$, $d_p = s'$. Здесь s — передний отрезок, s' — задний отрезок.

Для матриц действия одного \mathbf{M}_1 и двух \mathbf{M}_2 компонентов

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \mathbf{D}_1 \Phi_1 \mathbf{D}_0 = \begin{pmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 - d_0 \varphi_1 & \varphi_1 \\ -d_0 - d_1 + d_0 d_1 \varphi_1 & 1 - d_1 \varphi_1 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_2 \Phi_2 \mathbf{D}_1 \Phi_1 \mathbf{D}_0 = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} m_{11}^2 &= 1 - d_0 \varphi_1 - d_0 \varphi_2 - d_1 \varphi_2 + d_0 d_1 \varphi_1 \varphi_2, \\ m_{12}^2 &= \varphi_1 + \varphi_2 - d_1 \varphi_1 \varphi_2, \\ m_{21}^2 &= -(d_0 + d_1 + d_2) + d_0 d_1 \varphi_1 + d_0 d_2 \varphi_1 + \\ &\quad + d_0 d_2 \varphi_2 + d_1 d_2 \varphi_2 - d_0 d_1 d_2 \varphi_1 \varphi_2, \\ m_{22}^2 &= 1 - d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_1 - d_2 \varphi_2 + d_1 d_2 \varphi_1 \varphi_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Ясно, что с увеличением числа компонентов очень резко увеличивается громоздкость выражений для представления отдельных элементов матрицы, что серьезно затрудняет использование аналитического описания свойств габаритных схем.

Указанное затруднение можно обойти, используя символические выражения, получившие название скобок Гаусса [3], что позволяет получить как для элементов матрицы \mathbf{M} , так и гауссовых характеристик габаритных схем удобные аналитические выражения.

Используя скобки Гаусса, выражения (3, 4) для элементов матриц \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \begin{pmatrix} [-d_0, \varphi_1] & [\varphi_1] \\ [-d_0, \varphi_1, -d_1] & [\varphi_1, -d_1] \end{pmatrix}, \\ \mathbf{M}_2 &= \begin{pmatrix} [-d_0, \varphi_1, -d_1, \varphi_2] & [\varphi_1, -d_1, \varphi_2] \\ [-d_0, \varphi_1, -d_1, \varphi_2, -d_2] & [\varphi_1, -d_1, \varphi_2, -d_2] \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Используя метод математической индукции, элементы матрицы действия ОС из p компонентов \mathbf{M}_p можно представить в свернутом аналитическом виде следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_p &= \begin{pmatrix} m_{11}^p & m_{12}^p \\ m_{21}^p & m_{22}^p \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} [-d_0, \varphi_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] & [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] \\ [-d_0, \varphi_1, \dots, \varphi_p, -d_p] & [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_p, -d_p] \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ — скобка Гаусса n -го порядка.

При этом элементы m_{ij} матрицы действия \mathbf{M} имеют простой физический смысл

$$\begin{aligned} m_{11} &= [-d_0, \varphi_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] = W, \\ m_{12} &= [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] = 1/f' = \varphi, \\ m_{22} &= [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_p, -d_p] = V, \end{aligned}$$

где W — угловое увеличение, f' и φ — заднее фокусное расстояние и оптическая сила, V — линейное увеличение.

Условие сопряженности плоскостей предмета и изображения выражается следующим отношением:

$$m_{21} = [-d_0, \varphi_1, \dots, \varphi_p, -d_p] = 0.$$

В случае, когда предмет или изображение находятся на бесконечности, удобным для использования является матрица

$$\mathbf{M}_\Phi = \begin{pmatrix} \bar{m}_{11}^p & \bar{m}_{12}^p \\ \bar{m}_{21}^p & \bar{m}_{22}^p \end{pmatrix} = \Phi_p \mathbf{D}_{p-1} \dots \mathbf{D}_1 \Phi_1,$$

где в качестве входной и выходной плоскостей используются главные плоскости первого и последнего компонентов. В указанном пучке $d_0 = d_p = 0$, и аналогично соотношению (5) матрица \mathbf{M}_Φ в аналитическом виде записывается следующим образом:

$$\mathbf{M}_\Phi = \begin{pmatrix} [-d_1, \varphi_2, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] & [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] \\ [-d_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{p-1}, -d_{p-1}] & [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_{p-1}, -d_{p-1}] \end{pmatrix}, \quad (6)$$

при этом элементы матрицы \mathbf{M}_Φ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{11} &= -\frac{s_F}{f'}, \quad \bar{m}_{12} = \frac{1}{f'} = \varphi, \\ \bar{m}_{21} &= -\frac{f'^2 + s_F s'_F}{f'}, \quad \bar{m}_{22} = \frac{s'_F}{f'}, \end{aligned}$$

где s_F — передний фокальный отрезок, s'_F — задний фокальный отрезок.

Рассмотренные соотношения дают возможность проводить синтез и анализ свойств габаритных схем ОС различного назначения.

ПРИМЕР СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ВАРИООБЪЕКТИВА С АФОКАЛЬНОЙ НАСАДКОЙ

В качестве примера проанализируем основные свойства вариообъективов с афокальными насадками. Пусть $(p-1)$ -й компонент образует афокальную насадку. Это означает, что требуется выполнение условия афокальности, а именно

$$[\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-2}, \varphi_{p-1}] = 0. \quad (7)$$

Используя выражение (7) и свойства гауссовых скобок, преобразуем выражение для оптической силы объектива следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi &= [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_p] = \varphi_p [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}] + \\ &\quad + [\varphi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \varphi_{p-1}] = \varphi_p d_{p-1} [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_{p-1}] + \\ &\quad + \varphi_p [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_{p-2}, -d_{p-2}] = \varphi_p [\varphi_1, -d_1, \dots, \varphi_{p-2}, -d_{p-2}]. \end{aligned}$$

Это показывает, что оптическая сила системы Φ не зависит от промежутка d_{p-1} , а видимое увеличение Γ афокальной насадки составляет

$$\Gamma = 1 / [\Phi_1, -d_1, \dots, \Phi_{p-2}, -d_{p-2}],$$

отсюда $\Phi = \Phi_p / \Gamma$, или $f' = f'_p \Gamma$.

Аналогично с помощью аналитических выражений можно показать, что $s'_{f'} = f'_p = \text{const}$.

Для изменения фокусного расстояния объектива с афокальной насадкой используют изменение видимого увеличения насадки. Для его изменения при одновременном выполнении условия афокальности необходимо использовать два переменных воздушных промежутка, т.е. афокальная насадка может быть реализована минимально из трех компонентов. Следовательно, вариообъективы с афокальными насадками должны иметь не менее четырех компонентов.

Основными техническими требованиями, которым должна соответствовать габаритная схема, являются масштабные и габаритно-конструктивные требования.

К масштабным и габаритно-конструктивным характеристикам относятся:

оптическая сила системы в случае нахождения предмета или изображения на бесконечности

$$\Phi = [\Phi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \Phi_p] = \Phi_{\min} \div \Phi_{\max},$$

где $\Phi_{\min} - \Phi_{\max}$ — требуемый перепад оптической силы,

требуемый перепад линейного увеличения $V_{\min} - V_{\max}$ в случае репродукционной системы

$$V = [\Phi_1, -d_1, \dots, \Phi_p, -d_p] = V_{\min} \div V_{\max},$$

требуемые значения видимого увеличения в случае телескопической системы

$$\Gamma = [-d_1, \Phi_2, \dots, -d_{p-1}, \Phi_p] = \Gamma_{\min} \div \Gamma_{\max},$$

при этом

$$[\Phi_1, -d_1, \dots, -d_{p-1}, \Phi_p] = 0,$$

условия получения заданного расстояния от последнего компонента до плоскости изображения \bar{s}' : в случае репродукционной системы

$$s' = \frac{\bar{m}_{22}s + \bar{m}_{21}}{\bar{m}_{12}s + \bar{m}_{11}} \geq \bar{s}',$$

в случае системы типа объектив

$$s'_{f'} = \frac{\bar{m}_{22}}{\bar{m}_{12}} \geq \bar{s}';$$

условие получения заданного расстояния \bar{L} от предмета до изображения

$$L = -s + \sum_{i=1}^{p-1} d_i + s' = \bar{L},$$

условие получения заданной длины L ОС

$$L = \sum_{i=1}^{p-1} d_i + s' = L,$$

условие конструктивной реализуемости габаритной схемы

$$d_j \geq \varepsilon_j.$$

Выполнение ряда указанных условий при габаритном синтезе является обязательным. В этом случае полученные структура и габаритные параметры схемы являются решением габаритного синтеза. Однако таких решений может быть достаточно много и при разработке принципиальной габаритной схемы необходимо каким-то образом выделять наиболее перспективные решения.

Для нахождения области оптимальных решений (параметров габаритной схемы, удовлетворяющих требованиям ТЗ) следует использовать некие дополнительные критерии и условия, а также целевую функцию. Минимум целевой функции определяет оптимальную структуру и параметры габаритной схемы ОС. Формирование целевой функции позволяет найти конструктивные параметры такой схемы, которая одновременно с выполнением требований ТЗ обладала бы наибольшими коррекционными возможностями.

Для формирования параметров целевой функции введем ряд критериев рациональности построения габаритной схемы. В значительной степени коррекционные возможности схем определяются целесообразным распределением относительного отверстия и углового поля по компонентам.

Можно показать, что относительное отверстие $1:K_i$ отдельного i -го компонента пропорционально разности углов падающего и преломленного на компоненте параксиального луча, т.е.

$$1:K_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i = h_i \Phi_i.$$

Удобно ввести понятие полевой светосилы

$$1:K_i^\beta = \beta_{i+1} - \beta_i = y_i \Phi_i$$

и следующего критерия рациональности построения габаритной схемы MC

$$MC = \sum_i \left[(\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2 + (\beta_{i+1} - \beta_i)^2 \right] = \sum_i \left[\Delta \alpha_i^2 + \Delta \beta_i^2 \right].$$

Критерий MC определяет минимальность осевой и полевой светосил компонентов, но требует уточнения. Наш опыт показывает, что именно на этапе построения габаритной схемы (и не позже) необходимо выполнение следующего условия: оптические силы Φ_i и промежутки d_i должны быть выбраны таким образом, чтобы аберрации каж-

дого отдельного компонента были минимальны. Можно показать, что в области аббераций третьего порядка указанное условие приводит к следующим двум критериям оптимальности схемы [4–6].

Рассмотрим первый критерий. Введем величины

$$s_{\alpha}^i = h_i \Delta \alpha_i^3, \quad s_{\beta}^i = y_i \Delta \beta_i^3,$$

где $\Delta \alpha_i, \Delta \beta_i$ — углы преломления первого и второго парааксиальных лучей на i -ом компоненте. Причем с достаточной для практики степенью точности введенные величины пропорциональны суммам Зейделя, вносимым i -ым компонентом. Так, например, первые суммы Зейделя S_1^i, S_1^j i -го и j -го компонентов пропорциональны величинам $s_{\alpha}^i, s_{\alpha}^j$, т.е.

$$\frac{S_1^i}{S_1^j} \approx \frac{s_{\alpha}^i}{s_{\alpha}^j}.$$

Следовательно, для получения решений с минимальными суммами Зейделя по компонентам необходимо строить габаритные схемы с минимальными значениями величин $s_{\alpha}^i, s_{\alpha}^j$ по компонентам.

Таким образом, первый критерий оптимальности габаритной схемы заключается в минимальности функционалов w_i отдельных компонентов

$$w_i = s_{\alpha}^{i2} + s_{\beta}^{i2}$$

или суммарного критерия

$$t_k = \sum_i w_i.$$

При этом необходимо использовать нормировку парааксиальных лучей, определяемую входными координатами апертурного и главного реальных лучей. Так, например, нормировка для случая системы типа объектив такова —

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{p+1} &= D_{\text{ent pup}} / 2f' \\ \beta_1 &= \text{tg } \omega_{\text{max}} \end{aligned} \right\},$$

где ω_{max} — максимальный размер половины углового поля ОС.

Рассмотрим второй критерий. В области аббераций третьего порядка условие минимальности абберационных вкладов отдельных компонентов приводит к требованию минимальности оптических сил отдельных компонентов

$$\varphi_i \rightarrow \min.$$

Данное требование хорошо известно и используется оптиками при конструировании ОС.

Третий критерий. Кривизна поля изображения и возможность ее исправления во многом зависят от используемой габаритной схемы. В области аббераций третьих порядков кривизна поля изображения определяется четвертой суммой Зейделя S_4 ,

которая в случае тонкокомпонентной системы выражается в виде

$$S_4 = \sum_{i=1}^p \varphi_i \pi_i,$$

причем π_i не является действенным параметром при исправлении, так как в большинстве встречающихся на практике систем π_i мало отличается от 0,6–0,7. Следовательно, чтобы на дальнейших этапах проектирования не возникало принципиальных затруднений с исправлением четвертой суммы, необходимо выполнение условия

$$\sum_i \varphi_i \leq \mu,$$

где μ — некоторое малое число.

Четвертым критерием оптимальности построения схемы является выполнение полуэмпирического условия, связанного с увеличением в зрачках. Указанное условие играет особо важную роль при построении широкоугольных объективов с исправленной дисторсией и выражает связь увеличения в зрачках V_{pup} , относительного отверстия 1:K и углового поля 2ω . При этом увеличение в зрачках должно лежать в области, определяемой следующим соотношением

$$1 - \frac{1}{2K \text{tg } \omega} \leq V_{\text{pup}} \leq 1 + \frac{1}{2K \text{tg } \omega}.$$

В более общем случае это условие записывается в виде

$$1 - \frac{\sigma'_{A'} - \sigma_A}{\text{tg } \omega} \leq V_{\text{pup}} \leq 1 + \frac{\sigma'_{A'} - \sigma_A}{\text{tg } \omega},$$

где $\sigma_A, \sigma'_{A'}$ — апертурные углы в пространстве предметов и изображений.

Как показал анализ большого числа широкоугольных объективов, полученные соотношения правильно описывают область возможных значений увеличения в зрачках и являются существенными для построения схем таких объективов.

Приведенные условия являются обобщением условия Берека, по которому для исправления дисторсии необходимо выполнить требование $V_{\text{pup}} = 1$.

Выявленные критерии и параметры дают возможность создавать наиболее простые схемы с оптимальными условиями работы каждого отдельного компонента. Причем целесообразный выбор структуры и гауссовых параметров исходной структуры ОС предопределяет ее большие коррекционные возможности, успешный абберационный синтез и широкие допуски проектируемой ОС.

Для численной оценки рациональности синтеза структурной схемы и определения наилучшего решения вводится целевая функция Fz . Приведем пример построения целевой функции из N параметров

$$Fz = \sum_{k=1}^N p_k m_k t_k,$$

где p_k и m_k — весовые и масштабные коэффициенты целевой функции, t_k — выбранный критерий или конструктивный параметр габаритной схемы. Масштабные коэффициенты m_k целевой функции обеспечивают одинаковую размерность всех ее слагаемых в случае разной размерности параметров t_k .

Состав целевой функции при разработке ОС данного практического назначения формирует сам разработчик, включая в нее ранее введенные критерии с учетом значимости (веса) данного критерия (параметра) t_k , которые должны быть положительными. В случае необходимости параметр t_k целевой функции можно формировать через исходный параметр или критерий w_i ОС в виде

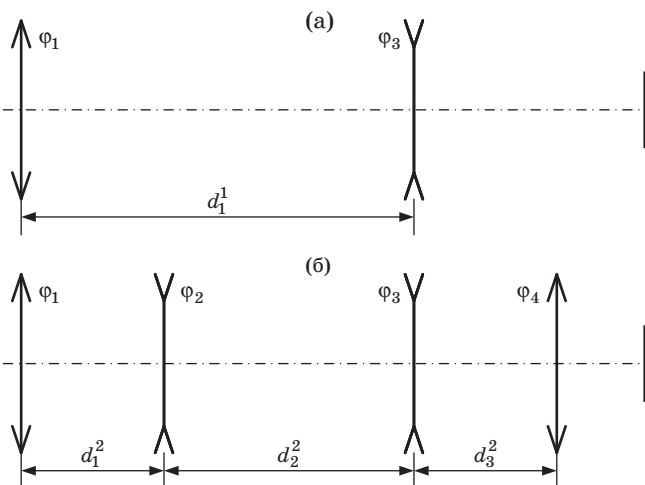
$$t_k = \sum_i w_i^2.$$

В некоторых случаях целевая функция позволяет из бесконечного числа решений (возможных структурных схем и их габаритных параметров) выделить только те решения, в которых возможно получение хорошей предварительной схемы.

Важно отметить, что подобный подход применим к синтезу исходных схем ОС не только с постоянными, но и переменными параметрами — вариосистем [7].

ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ СХЕМЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ОБЪЕКТИВА С ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Изменение фокусного расстояния объектива должно происходить за счет введения (выведения) дополнительных оптических элементов в ход лучей. Структурная схема такого объектива приведена на рисунке.



Структурные схемы тепловизионного объектива с дискретным изменением фокусного расстояния в режимах опознавания (а) и в обнаружения (б).

Таблица 1. Конструктивные параметры объектива

Оптические характеристики	Режим опознавания	Режим обнаружения
Фокусное расстояние, мм	293	97,6
Размер входного зрачка, мм	145	58
Относительное отверстие	1:2	1:1,7
Угловое поле	по вертикали	2°30'
	по горизонтали	4°
Расстояние от вершины первой поверхности до изображения, не более, мм	240	
Задний отрезок, не менее, мм	90	

Проведенный параметрический синтез структурной схемы объектива позволил получить значения конструктивных параметров, которые приведены в табл. 1.

ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ СТРУКТУРНО-ГАБАРИТНОЙ СХЕМЫ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОГО ВАРИООБЪЕКТИВА

Исходные данные для расчета габаритной схемы вариообъектива:

требуемый перепад фокусного расстояния $M_{\text{req}} = 10,0$,

минимальное фокусное расстояние $f'_{\text{lens_min}} = 30,0$,

размер диагонали приемника излучения $D_{\text{CCD}} = 16,5$,

максимально допустимая длина (расстояние от 1-го компонента до изображения) $L_{\text{per}} = 135,0$,

указано, что апертурная диафрагма должна быть расположена после 2-го компонента (Nk_{AD}) на постоянном расстоянии ($z_{\text{AD}} - Nk_{\text{AD}} = 2$, $z_{\text{AD}} = 1,6$, диапазон диафрагменных чисел вариообъектива $Nd_{\text{min-max}}: 2,5-7,0$,

число вариопозиций, для которых проводится габаритный синтез, $Kol_F = 7$,

минимально допустимый световой диаметр 2-го компонента $D_{2\text{min}} = 5,8$,

минимально допустимое диафрагменное число компонентов $Nd_{\text{per}} = 1,17$,

минимально допустимое расстояние между компонентами во всех вариоположениях $d_{\text{min}} = 10,5$,

максимально допустимое перемещение компонентов $s_{\text{per}} = 50,0$,

допустимая нетелецентричность главного луча на выходе $\omega_{\text{per}} = 7,0$.

Для справки приведен диапазон полного углового поля вариообъектива $2\omega_{\text{lens}}$ в градусах — $2\omega_{\text{lens}} = 3,2-30,8^\circ$.

Таблица 2. Результаты синтеза габаритной схемы

R	f'_1	f'_2	D_2	d_1	g_2	s_2	s_4	Nd	Ns	dm	ω_{\min}	ω_{\max}
0	63,9	-8,5	7,8	34,6	-16,2	19,3	41,9	1,10	0,00	11,5	-3,2	6,7
0	63,9	-8,5	7,6	35,3	-17,0	18,6	38,1	1,06	1,23	11,0	-0,7	8,3
0	63,9	-8,5	7,6	35,8	-15,4	18,4	43,2	1,03	1,17	11,0	-0,9	8,0
0	63,9	-8,5	6,5	36,7	-17,0	17,8	41,0	1,00	1,12	11,2	1,3	11,7
0	63,9	-8,5	6,5	36,7	-17,9	17,5	37,0	1,02	1,12	11,4	2,1	12,6
0	63,9	-8,5	6,4	37,0	-17,0	17,4	38,4	1,00	1,10	11,0	2,1	12,7
0	65,7	-9,0	6,7	36,8	-18,7	18,7	38,2	1,07	1,15	10,7	1,5	12,0
0	65,7	-9,0	7,6	36,9	-17,9	18,8	41,4	1,03	1,15	10,8	1,0	9,3
0	65,7	-9,0	7,6	37,0	-17,9	18,7	40,5	1,03	1,14	10,5	1,3	9,6
1	65,7	-9,5	8,1	33,5	-18,7	21,2	45,6	1,18	1,31	10,6	-3,6	5,9
2	66,3	-9,5	8,0	34,1	-18,7	21,2	44,7	1,18	1,30	10,7	-3,6	6,2
3	66,3	-9,5	8,0	34,6	-19,6	20,8	43,1	1,17	1,26	10,9	-3,2	7,0
4	66,9	-9,5	8,0	34,7	-18,7	21,2	43,7	1,19	1,29	10,8	-3,5	6,5
5	66,9	-9,5	7,9	35,0	-19,6	21,2	44,6	1,17	1,27	10,7	-2,1	6,6
6	67,5	-9,5	7,9	35,3	-18,7	21,0	42,8	1,18	1,27	10,9	-3,5	6,8

Примечание. R — номер решения, f'_1, f'_2 — фокусные расстояния 1-го и 2-го компонентов, D_2 — световой диаметр 2-го компонента, d_1 — начальное расстояние между 1-ым и 2-ым компонентами, s_2, s_4 — максимальное перемещение 2-го и 4-го компонентов, g_2 — параметр для габаритного синтеза вариообъектива, Nd, Ns — минимальное и среднее диафрагменное число компонентов, dm — минимальное расстояние между компонентами во всех вариоположениях, $\omega_{\min}, \omega_{\max}$ — минимальный и максимальный углы главного луча на выходе.

Результаты синтеза габаритной схемы приведены в табл. 2. Найдено 6 решений, которые удовлетворяют всем требованиям к расчету структурно-габаритной схемы вариообъектива.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗА ГАБАРИТНОЙ СХЕМЫ

Конструктивные параметры $\phi_i, d_i, t_{\text{пор}}$ габаритной схемы образуют вектор неизвестных

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

При этом размерность вектора \mathbf{X} , т.е. размерность n пространства неизвестных, зависит от числа компонентов в схеме.

Заданные в ТЗ масштабные, габаритные и другие характеристики образуют набор нелинейных ограничений типа равенств

$$h_i(\mathbf{X}) = 0, \quad i = \overline{1, k} \quad (8)$$

и неравенств

$$g_i(\mathbf{X}) \geq 0, \quad i = \overline{1, l}, \quad (9)$$

а ограничения на допустимые значения промежутков между компонентами d_i , ограничения на значения оптических сил образуют набор явных ограничений

$$a_t \leq x_t \leq b_t. \quad (10)$$

Выбранные разработчиком, описанные ранее критерии оптимальности построения габаритной схемы включаются в целевую функцию Fz .

Задачу синтеза габаритной схемы на основе требований ТЗ целесообразно разделить на две подзадачи.

Первая подзадача заключается в определении минимального числа компонентов и некоторого начального приближения для конструктивных параметров габаритной схемы. С учетом введенных обозначений решение подзадачи заключается в нахождении вектора \mathbf{X} минимальной размерности n_{\min}

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_{\min}}\}, \quad (11)$$

обеспечивающего совместность систем ограничений (8–10).

Формально задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть U^n — множество векторов \mathbf{X} размерности n (допустимая область), при которых система ограничений (8–10) совместна

$$U^n = \left\{ \mathbf{X} \in \mathbb{R}^n \vee h_i(\mathbf{X}) = 0, g_i(\mathbf{X}) \geq 0, a_t \leq x_t \leq b_t \right\}.$$

Из физического смысла задачи очевидно, что при достаточном числе компонентов в габаритной схеме возможно выполнение всех требований ТЗ, относящихся к габаритному решению, т.е. при

достаточном числе компонентов допустимая область U^n не пуста

$$U^n \neq \emptyset.$$

Следовательно, задача поиска

$$n_{\min} = \min_n \{U^n \neq \emptyset\} n$$

определена корректно и заключается в нахождении минимальной размерности n_{\min} и некоторого

$$\mathbf{X} \in U^{n_{\min}}.$$

Вторая подзадача заключается в оптимизации коррекционных возможностей полученной габаритной схемы путем минимизации оценочной функции при обеспечении нахождения решения в допустимой области, определяемой системой ограничений (8–10). При этом находится такое значение вектора переменных

$$\mathbf{X} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n_{\min}}\} \in U^{n_{\min}},$$

при котором оценочная функция Fz принимает минимальное значение.

Описанная методика построения габаритных схем для ОС с постоянными характеристиками

естественным образом обобщается на случай ОС с переменными характеристиками. При этом для оптимизации габаритных схем одновременно рассматриваются m различных систем, имеющих некоторые общие конструктивные параметры, а минимизируемый функционал и накладываемые ограничения являются общими для m рассматриваемых габаритных схем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введены и формализованы необходимые условия на структурные и габаритные параметры исходной схемы проектируемой оптической системы, при выполнении которых она удовлетворяет требованиям технического задания и является решением задачи синтеза необходимой системы. Для выбора наилучшего решения введен ряд критериев и целевая функция. Приведены примеры синтеза структурно-габаритных схем вариообъективов с дискретным и плавным изменением фокусного расстояния. Сделана попытка формализации процесса синтеза исходной схемы оптических систем для изучения возможности его проведения в автоматизированном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: изд. Мир, 1978. 296 с.
2. Kloos G. Matrix methods for optical layout. USA: SPIE Press, 2007. 121 p.
3. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. М.: изд. Иностранной литературы, 1962. 487 с.
4. Бездидько С.Н. Синтез и оптимизация осесимметричных оптических систем // Диссерт. доктора техн. наук. 1991.
5. Bezdidko S.N. New principles of synthesis and optimization of optical systems using a computer // OSA Proc. Internat. Optical Design Conf. 1994. V. 22. P. 16–22.
6. Bezdidko S.N. New principle of optical system synthesis // Proc. SPIE. 1995. V. 2539. P. 208–211.
7. Khorokhorov A.M., Piskunov D.E., and Shirankov A.F. First-order method of zoom lens design by means of generalized parameters // JOSA A. 2016. V. 33. № 8. P. 1537–1545.