

ОСОБЕННОСТИ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА «РАЗРАБОТКА ВАРИОСИСТЕМ»

О.В. Рожков¹, Д.Е. Пискунов¹, П.А. Носов¹, В.Ю. Павлов¹, А.М. Хорохоров¹, А.Ф. Ширанков¹
¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация

Описаны основные теоретические положения научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Разработка вариосистем»: методы расчёта как классических, так и лазерных вариосистем, систем с линейной и нелинейной связью между перемещениями компонентов, основы теории обобщённых параметров профессора И.И. Пахомова, метод габаритного синтеза многокомпонентных вариосистем, методика абберационного синтеза вариосистем в области аббераций третьего и пятого порядков. Эффективность методов иллюстрируется примерами разработок вариосистем с высокими оптическими характеристиками.

Ключевые слова: оптическая система, система переменного увеличения, панкратическая система, вариосистема, автоматизированный расчёт, структурная схема, обобщённые параметры, дроби Чебышева, полиномы Чебышева, абберации, разрешение вариосистемы.

Цитирование: Рожков, О.В. Особенности теории и практики научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Разработка вариосистем» / О.В. Рожков, Д.Е. Пискунов, П.А. Носов, В.Ю. Павлов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 72-83. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-72-83.

Введение

Развитие вариосистем началось ещё в XIX веке, когда появились первые зрительные трубы переменного углового увеличения [1]. Разработка вариообъективов требовала решения дополнительной задачи – компенсации смещения фокальной плоскости при изменении фокусного расстояния. В 1902 году такая задача частично была решена [2]: разработанный объектив обеспечивал компенсацию смещения плоскости изображения всего в двух вариопозициях. Первый серийный вариообъектив Cooke Varo Lens с диапазоном фокусных расстояний 40–120 мм для киносъёмки был выпущен в 1932 году компанией Bell and Howell [3]. В большинстве первых вариообъективов использовалась оптическая компенсация смещения плоскости изображения, т.е. компоненты перемещались по линейным законам так, что допускалось небольшое смещение плоскости изображения. Благодаря развитию технологий, в частности, появлению шаговых и ультразвуковых двигателей [4], высокоточных кулачковых механизмов, в подавляющем большинстве современных вариообъективов используется механическая компенсация: плоскость изображения остаётся неподвижной во всём диапазоне изменения увеличений, компоненты при этом перемещаются по нелинейным законам. Применение низкодисперсионных стёкол и кристаллов, пластиков, стёкол с особым ходом дисперсии, асферических поверхностей, дифракционных оптических элементов [5, 6] способствовало созданию высококачественных вариообъективов.

Создание вариосистем с высокими оптическими характеристиками требовало разработки соответствующих методов расчёта. Развитием этих методов занимались отечественные и зарубежные учёные: Л. Бергштейн, Ф. Бэк, К. Танака, Д.С. Волосов, М.С. Стефанский, М.Г. Шпякин и др. Необходимо отметить, что, несмотря на многочисленные публикации, большинство авторов ограничивается рассмотрением лишь частных случаев систем переменного увеличения, например, ограничением числа подвиж-

ных компонентов, одним способом компенсации смещения плоскости изображения и т.д.

Научное направление по разработке вариосистем в МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана возникло в 1955 году. Основоположник этого направления – д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ Иван Иванович Пахомов (1930–2014 гг.). В 1976 году профессор И.И. Пахомов опубликовал монографию «Панкратические системы» [7], в которой впервые с единых позиций были изложены теоретические основы расчёта оптических систем с переменными характеристиками: зрительные трубы, панкратические системы имитаторов, тренажеров и т.д. В [7] также приведены многочисленные примеры и результаты расчёта вариосистем, полученные на доступных в то время вычислительных средствах. Крайне важным для практического использования вариосистем явилось изложение в этой работе методов расчёта влияния отклонения параметров и расчёта допусков на оптическую схему различного назначения.

Уже из первых работ стало ясно, что для разработки высококачественных вариосистем необходимо использовать современные численные методы и специальные алгоритмы расчёта.

Востребованность вариосистем для решения задач в различных областях науки и техники по-прежнему остаётся очень высокой. Поэтому целью настоящей статьи является изложение методов автоматизированного расчёта оптических вариосистем различных классов и назначения, разработанных в МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана.

1. Классы вариосистем

Развитие науки и техники привело к появлению, помимо класса классических вариосистем, нового класса – лазерных вариосистем.

К классу классических вариосистем относятся вариообъективы, афокальные системы переменного увеличения, а также различная оптика технологического и специального назначения, где переменными характери-

стиками являются размер и (или) положение выходного изображения, расположение зрачков, плоскость фокусировки и др. [7]. Эти вариосистемы работают в разных спектральных диапазонах и широко используются в промышленности и науке.

Вариообъективы с большой кратностью изменения фокусного расстояния предназначены для видеонаблюдения, фотографирования и документирования, контроля за процессами и событиями и могут предъявить оператору интересующий участок пространства с требуемой детализацией. Такие системы часто используются для поиска и сопровождения объектов в автоматическом режиме.

Афокальные системы обеспечивают большую кратность изменения углового увеличения и позволяют изменять видимое увеличение наблюдательных приборов (биноклей, стереотруб и т.п.) и прицелов. Также они могут использоваться для изменения угловой расходимости лазерного излучения.

Новый класс лазерных вариосистем предназначен для формирования излучения лазеров, обеспечивая плавное изменение параметров выходного пучка [7–11]. Лазерные вариосистемы используются в технологических лазерных оптических головках, аддитивных технологиях, для создания оптики спецназначения с уникальными свойствами и других областях.

2. Основные теоретические положения разработки вариосистем

Как показал профессор И.И. Пахомов, для системы переменного увеличения, состоящей из произвольного числа компонентов, которые вместе с плоскостью предмета перемещаются по линейному закону, смещение плоскости изображения определяется выражением [7]:

$$\Delta = \frac{f(m)}{\delta(m)} = \frac{\sum_{k=0}^{n+1} c_k m^k}{\sum_{k=1}^n d_k m^k}, \tag{1}$$

где m определяет величину смещения компонентов и предметной плоскости; n – число компонентов; d_k, c_k – коэффициенты, выражаемые через параметры

$$U = \left(\frac{m + \sqrt{m^2 - h^2}}{2} \right)^{l_1+1} \left(\frac{\alpha_1 m - h^2 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{\alpha_1} \right)^{l_1} \dots + \left(\frac{m - \sqrt{m^2 - h^2}}{2} \right)^{l_1+1} \left(\frac{\alpha_1 m - h^2 - \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{\alpha_1} \right)^{l_1} \dots,$$

$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_{k-l-1}$ – корни знаменателя дроби, т.е. уравнения $V=0$; l_1, l_2 – кратность корней V , причём $l_1+l_2+\dots = k-l-1$; $-h \leq m \leq h$.

Предел отклонения величины смещения плоскости изображения Δ от нуля определяется пределом отклонения дроби от нуля:

$$L = \pm \frac{h^k}{2^{l_1} q_{k-l-1} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \right]^{l_1} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_2^2}} \right]^{l_2} \dots}$$

панкратической системы и передаточные числа между перемещениями компонентов.

Коэффициенты d_k могут быть найдены из условия обеспечения заданного перепада увеличений M :

$$\begin{cases} (1-M)\delta = 2 \sum_{k=1}^{n+1} d_k (k - \text{нечётные}), \\ (1+M)\delta = 2 \sum_{k=1}^{n+1} d_k (k - \text{чётные}), \end{cases}$$

где δ – значение знаменателя в (1). Величина δ при заданных c_k обеспечивает получение допустимого Δ .

Значения коэффициентов c_k в числителе (1) можно задавать различными способами [7].

Способ 1. Коэффициенты выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась неподвижность плоскости изображения в заданных положениях. Например, для двухкомпонентной системы ($n=2$) из (1) ясно, что Δ может равняться нулю не более чем в трёх точках. Обычно эти точки принимаются $m_1 = -1, m_2 = 0, m_3 = 1, \Delta(-1) = \Delta(0) = \Delta(1) = 0$, т.е. плоскость изображения неподвижна в нулевом и двух крайних положениях.

Способ 2. В качестве полинома $f(m)$ в числителе (1) можно выбрать такой, который обеспечивает наименьшее значение $\max|f(m)|$ в пределах перемещения компонентов. Такими полиномами являются полиномы Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля, которые на интервале $-1 \leq m \leq 1$ определяются с помощью рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned} T_0(m) &= 1, T_1(m) = m, \\ T_n(m) &= 2mT_{n-1}(m) - T_{n-2}(m). \end{aligned} \tag{2}$$

Значения полиномов, нормированных на коэффициент при старшем члене, по модулю не превышают $1/2^{n-1}$.

Способ 3. Использовать при расчёте дроби Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля. В общем случае они могут быть записаны следующим образом [7]:

$$\frac{U}{V} = \frac{m^k + p_1 m^{k-1} + p_2 m^{k-2} + \dots + p_{k-1} m + p_k}{q_0 m^{k-l-1} + q_1 m^{k-l-2} + \dots + q_{k-l-1}},$$

где

$$\left(\frac{\alpha_1 m - h^2 + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{\alpha_1} \right)^{l_1} \dots + \left(\frac{m - \sqrt{m^2 - h^2}}{2} \right)^{l_1+1} \left(\frac{\alpha_1 m - h^2 - \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha_1^2}} \sqrt{m^2 - h^2}}{\alpha_1} \right)^{l_1} \dots,$$

Расчёты показывают, что для двух- и трёхкомпонентных оптических систем величину $L = \max|\Delta|$ можно уменьшить в 2-3 раза по сравнению со способом 2.

Определив одним из описанных способов коэффициенты d_k и c_k , можно вычислить все параметры панкратической системы. Формулы, связывающие d_k, c_k и передаточные отношения с параметрами для одно-, двух-, трёх- и n -компонентных систем, представлены в [7]. Отметим, что смещение плоскости изображения можно полностью компенсировать, сделав одно из передаточных отношений переменным. Зави-

симось передаточного отношения от параметра m находится из условия $f(m) = 0$.

На основе теории, изложенной в работе [7], разработана методика расчёта панкратических систем с помощью обобщённых параметров [12, 13]. Методика позволяет при заданном перепаде увеличения определить Гауссовы параметры систем, обеспечивающие этот перепад, при этом всё многообразие систем данного типа (одно-, двух-, трёх- или n -компонентных) исследуется путём изменения одного обобщённого параметра.

Например, выражения для расчёта параметров двухкомпонентной системы (рис. 1) имеют вид [12]:

$$\begin{aligned} z'_{20} &= Z'_{20} i_2, f_2^2 = F_2^2 i_2 (i_2 - i_1), \\ z_0 &= Z_0 (i_0 - i_1), d_{10} = D_{10} (i_2 - i_1), \\ f_1^2 &= F_1^2 (i_2 - i_1)(i_0 - i_1), \end{aligned} \quad (3)$$

где i_0, i_1, i_2 характеризуют передаточные отношения между перемещениями предметной плоскости и компонентами; $Z_0, Z'_{20}, D_{10}, F_1, F_2$ – обобщённые параметры; f_1, f_2 – фокусные расстояния компонентов; d_{10} – расстояние между задним фокусом первого компонента и передним фокусом второго компонента; z_0, z'_{20} – расстояние от фокуса первого компонента до предметной плоскости ПП и от фокуса второго компонента до плоскости изображения ПИ соответственно.

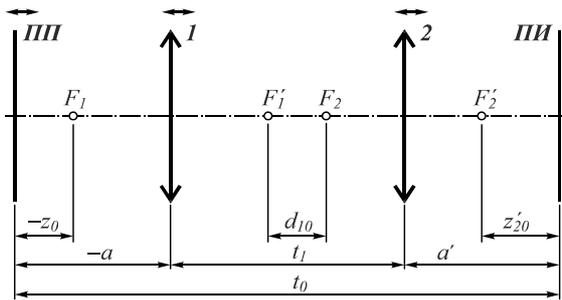


Рис. 1. Двухкомпонентная вариосистема

В случае линейной (оптической) компенсации смещения плоскости изображения передаточные отношения постоянны. Для перехода к системам с механической компенсацией необходимо по меньшей мере одно из передаточных отношений назначить переменным.

Обобщённые параметры вычисляются по формулам [12]:

$$\begin{aligned} Z'_{20} &= \alpha y, Z_0 = \frac{\alpha(\gamma y - 1)}{\alpha^2 y - \gamma}, F_2^2 = \alpha^2 y^2 - \gamma y, \\ D_{10} &= Z'_{20} - Z_0, F_1^2 = M \frac{\gamma y - 1}{(\alpha^2 y - \gamma)^2}, \\ \alpha &= (1 - M)/2, \gamma = (1 + M)/2, \end{aligned}$$

где M – перепад увеличений или фокусных расстояний; y – обобщённый параметр.

В формулах (3) передаточные числа i_0, i_1, i_2 определяются из условия обеспечения заданной длины системы и увеличения в исходном («нулевом») положении компонентов [14, 15].

Задавшись перепадом увеличений M и варьируя параметр y , можно получить множество решений, из которых могут быть отобраны наилучшие согласно заданному критерию качества.

В случае механической компенсации смещения плоскости изображения законы перемещения определяются из условия $\Delta = 0$ для всего диапазона изменения m [12] или из расчёта вспомогательных лучей [14, 15]. Выражения для законов перемещения компонентов, полученных последним методом, имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{t_0}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2}{t_0 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2} + \frac{(\beta - 1)^2}{t_0^2 \beta \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2} \right)} \right], \\ a &= \frac{t_1 \bar{\varphi}_2 - 1 + 1/\beta}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - t_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}, a' = \frac{1 - \beta - t_1 \bar{\varphi}_1}{\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 - t_1 \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2}, \end{aligned}$$

где $\bar{\varphi}_i$ – оптическая сила i -го компонента эквивалентной системы; t_1 – расстояние между компонентами; a и a' – расстояния от первого компонента до предметной плоскости и от последнего компонента до плоскости изображений; β – линейное увеличение оптической системы.

Предложенная теория и разработанные на её основе методы расчёта отличаются универсальностью, т.е. пригодны для расчёта систем различного назначения и с любым способом компенсации смещения плоскости изображения. Методы хорошо алгоритмируются для их реализации в виде программ расчётов вариосистем. Другим важным преимуществом разработанных методов является то, что они позволяют определять оптические силы компонентов, обеспечивающие заданный перепад увеличений, в то время как в ряде других работ исследуются лишь законы перемещения компонентов при заданных оптических силах, при этом нет гарантии, что заданные силы обеспечат необходимый перепад увеличений.

3. Развитие теории и новые методы расчёта вариосистем

Из опыта проектирования вариообъективов известно, что широкий спектр технических задач, где требуется их применение, может быть решён с помощью систем с двумя подвижными компонентами. В работах [14, 15] на основе теории обобщённых параметров панкратических систем профессора И.И. Пахомова предложена методика автоматизированного выбора оптимальной структуры и габаритного синтеза вариообъективов с двумя подвижными компонентами. Методика предусматривает последовательное выполнение трёх этапов: приведение исходной системы вариообъектива к эквивалентной одно-, двух- или трёхкомпонентной панкратической системе, определение Гауссовых параметров эквивалентной системы, обратный переход от эквивалентной системы к исходной. Множество полученных таким образом систем анализируется затем с помощью целевой функции, которая оценивает их качество. Методика позволяет с помощью обобщённых параметров про-

анализировать всё многообразие систем с двумя подвижными компонентами.

Для того чтобы получить большой перепад фокусных расстояний или увеличений и при этом удовлетворить заданным габаритам системы, а также обеспечить приемлемые относительные отверстия, необходимо использовать вариосистемы с числом подвижных компонентов более двух. В работах [24, 25] разработан метод расчёта систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных и неподвижных компонентов. Метод предусматривает определение законов перемещения компонентов в виде разложения по базисным функциям.

В последнее время появились технологии, позволяющие изменять оптическую силу линзы, что может быть использовано для разработки более простых, компактных и лёгких вариосистем. В работе [26] показано, что разработанный в [24, 25] метод может быть применён и для расчёта систем, включающих линзы с изменяемой оптической силой.

Задача расчёта вариосистемы в этом случае сводится к решению системы нелинейных уравнений

$$P(a_i, b_i) = P(m),$$

в которой P – вектор параксиальных величин (например, фокусное расстояние, увеличение или длина системы), которые должны быть равны заданным значениям; m – аргумент базисной функции, определяющий положение компонентов или оптическую силу; a_i, b_i – коэффициенты разложения ($i = 1, 2, \dots, N$); N – количество членов разложения.

Закон изменения воздушного промежутка $d(m)$ и закон изменения оптической силы $\varphi(m)$ отдельного компонента, представленные в виде разложения по базисным функциям, могут быть записаны следующим образом [26]:

$$d(m) = \sum_{i=0}^N a_i F_{di}(m), \quad \varphi(m) = \sum_{i=0}^N b_i F_{\varphi i}(m),$$

где $F_{di}(m), F_{\varphi i}(m)$ – базисные функции i -го порядка.

В результате расчёт вариообъектива сводится к определению коэффициентов разложения a_i, b_i . Такой подход позволяет рассчитывать как традиционные системы с подвижными компонентами, так и комбинированные, т.е. включающие и подвижные компоненты, и компоненты с изменяемой оптической силой.

Отметим, что если в разложении для $d(m)$ в качестве базисных функций выбрать степенные и ограничиться первым членом разложения, то получим системы с линейной связью между перемещениями компонентов; если обеспечить равенство по модулю этих коэффициентов для всех расстояний между компонентами, то получим системы с жёсткой связью между перемещениями компонентов (оптическая компенсация); в случае произвольного числа коэффициентов разложения получаем системы с механической компенсацией.

Для численных расчётов по данному методу необходима исходная система. Такая система может быть

получена аналитически с помощью теории обобщённых параметров [7, 12–14].

Важным этапом расчёта вариосистем является абберационный синтез. В работах [27–31] разработана методика абберационного синтеза вариосистем в области аббераций третьего и пятого порядков. Методика состоит из следующих этапов: 1) определение основных параметров и хроматических коэффициентов тонких компонентов; 2) синтез компонентов без учёта их толщин в области аббераций третьего порядка; 3) переход от бесконечно тонких компонентов к компонентам конечной толщины; 4) аналитико-оптимизационный синтез в области аббераций третьего и пятого порядков.

На первом этапе на основе данных, полученных в результате габаритного синтеза, определяются основные параметры \bar{P} и \bar{W} и хроматические коэффициенты C тонких компонентов. Метод определения параметров основан на теории аббераций третьего порядка. В работах [27, 29] показано, что для вычисления \bar{P} и \bar{W} необходимо решить систему линейных уравнений:

$$\sum_i A_{i,j} \bar{P}_i + \sum_i B_{i,j} \bar{W}_i = F_j, \quad j = 1 \dots N, \quad (4)$$

где i – номер компонента; j – номер положения компонентов; N – число положений; $A_{i,j}, B_{i,j}, F_j$ – коэффициенты, определяемые с помощью параметров вспомогательных лучей.

В зависимости от соотношения числа компонентов и их положений система уравнений (4) может быть как строго определённой, так и переопределённой или недоопределённой, что обуславливает методы её решения. Предлагается отыскивать псевдорешение с минимумом нормы невязки (евклидова, Чебышева и др.).

Аналогичный подход применён для определения хроматических коэффициентов C_i .

Решение системы (4) в совокупности с решением системы уравнений для хроматических коэффициентов позволяет получить все исходные данные (φ_i, \bar{P}_i и \bar{W}_i, C_i) для синтеза отдельных тонких компонентов вариосистемы.

Далее следует этап синтеза компонентов в области аббераций третьего порядка. В работе [31] предложен метод синтеза компонента, состоящего из произвольного числа линз. Метод предусматривает приведение компонента к тонкому триплету и расчёт его параметров, при этом параметры линз, не входящих в триплет, используются для обеспечения положительных толщин компонентов и минимизации аббераций высших порядков.

Конструктивные элементы оптической системы, состоящей из бесконечно тонких линз, являются лишь первым приближением решения задачи расчёта вариосистемы. Для расчёта конструктивных параметров реальной оптической системы необходимо перейти к линзам конечной толщины. Предлагаемый метод перехода предусматривает сохранение оптических

сил компонентов системы и сумм Зейделя. Преимуществом такого метода является неизменность оптических характеристик вариосистемы при переходе от тонких к «толстым» компонентам. Кроме того, появляется возможность ввода толщины для каждого компонента независимо от других. Переход к компонентам конечной толщины осуществляется путём минимизации оценочной функции, в которую входят оптические силы и суммы Зейделя, а также другие члены, например, учитывающие требование минимизации кривизны поверхности.

Теория и практика абберационных расчётов показывают, что реальные абберации светосильных оптических систем сильно отличаются от аббераций третьего порядка, поэтому для таких систем на этапе синтеза следует учитывать абберации высших порядков. В работе [30] предложен аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем, позволяющий проводить расчёт вариообъективов с учётом аббераций пятого порядка. Метод основан на разложении функции поперечной абберации по полиномам Чебышева с последующей минимизацией коэффициентов разложения. Впервые идея использования полиномов Чебышева для абберационного расчёта оптических систем была предложена в [7] и развита в [9, 30].

Разложение поперечной абберации $\Delta y'$ по полиномам Чебышева имеет вид [28, 31]:

$$\begin{aligned} \Delta y'(x, y) = & b_1 T_1(y) + b_2 T_1(x) + b_3 T_2(y) + b_4 T_2(x) + \\ & + b_5 T_1(y) T_1(x) + b_6 T_3(y) + b_7 T_3(x) + b_8 T_1(y) T_2(x) + \\ & + b_9 T_2(y) T_1(x) + b_{10} T_4(y) + b_{11} T_4(x) + b_{12} T_1(y) T_3(x) + \\ & + b_{13} T_2(y) T_2(x) + b_{14} T_3(y) T_1(x) + b_{15} T_5(x) + \\ & + b_{16} T_1(y) T_4(x) + b_{17} T_3(y) T_2(x) + b_{18}, \end{aligned}$$

где b_1, \dots, b_{18} – коэффициенты разложения; $T_1(x) \dots T_5(x)$ – наименее отклоняющиеся от нуля полиномы Чебышева для меридионального (y) и сагитального (x) сечений соответственно (см. рекуррентное соотношение (2)). В работах [27, 30] получены выражения, связывающие коэффициенты $b_1 \dots b_{18}$ с коэффициентами разложения в степенной ряд.

Важными аргументами в пользу целесообразности использования полиномов Чебышева являются следующие их свойства. Во-первых, из всех полиномов степени n полиномы Чебышева на отрезке $[-1; 1]$ имеют наименьшее отклонение от нуля. Во-вторых, область значений полиномов по модулю не превышает $1/2^{n-1}$. Учитывая вышеизложенные свойства, задача расчёта объектива на этапе аналитико-оптимизационного синтеза может быть сведена к минимизации абсолютных значений коэффициентов разложения по полиномам Чебышева. При этом автоматически минимизируются абберации третьего и пятого порядков для всего зрачка. Кроме того, значения коэффициентов разложения позволяют оценить уровень этих аббераций, то есть контролировать ход процесса при автоматизированном абберационном синтезе. Для минимизации коэффициентов b_1, \dots, b_{18}

требуются значительно меньшие вычислительные мощности и время, чем для минимизации реальных аббераций, полученных из расчёта хода лучей, поскольку для вычисления коэффициентов разложения достаточно рассчитать ход всего двух вспомогательных лучей.

Разработанные методики габаритного и абберационного синтеза могут быть применены не только для проектирования вариосистем, но и для систем с постоянными характеристиками. Выражения, определяющие изменение фокусного расстояния и уровень абберационной коррекции системы в зависимости от взаимного положения компонентов, используются для уменьшения чувствительности системы к погрешностям установки компонентов системы. Например, в работах [22, 23] представлены результаты расчёта широкоугольного проекционного объектива согласно предложенной методике.

Для расчёта вариосистем, работающих с лазерным излучением, используется теория лазерной оптики или теория классической оптики. Выбор теории определяется типом резонатора лазера (устойчивый или неустойчивый). Вариосистемы для изменения параметров пучка, формируемого устойчивыми резонаторами, рассчитываются по теории лазерной оптики для когерентного излучения [8, 9, 35–37]. Для описания пространственной структуры Гауссова пучка вводят перетяжку (сечение пучка минимального диаметра) и «ближнюю зону». Длина ближней зоны определяется конфокальным параметром пучка z_k и равняется $2z_k$ (для некогерентного излучения $z_k=0$). Огибающая (каустика) Гауссова пучка представляет однополостный гиперболоид вращения. Для Гауссова пучка кривизна волнового фронта в перетяжке и в дальней зоне равна нулю, а при $z = z_k$ принимает максимальное значение [8, 9, 36].

Преобразование Гауссовых пучков оптическими системами описывается более общими формулами, которые для случая некогерентного излучения ($z_k=0$) переходят в соответствующие выражения классической оптики [7, 35]. Хотя формулы принципиально отличаются уже в параксиальной области, очень часто при разработке лазерных вариосистем, преобразующих Гауссовы пучки, используются неприменимые для их расчёта программные средства, созданные на основе теории классической (некогерентной) оптики.

Для расчёта лазерных оптических систем должны быть известны все параметры излучения на выходе лазера. Из-за того, что в паспорте на источник лазерного излучения часто приводится неполный набор пространственных параметров пучка, необходимые для расчёта лазерной оптики параметры пучка на выходе лазера можно определить экспериментально [40, 41] либо рассчитать для заданной оптической схемы резонатора и параметров накачки [8, 34, 35, 42–44].

Синтез лазерных вариосистем включает два основных этапа: структурно-габаритный синтез и абберационный синтез. Из-за особенностей преобразова-

ния Гауссовых пучков оптическими системами при выполнении этих этапов нужно использовать специальные методы расчёта и программные средства. Анализ качества синтезированных лазерных вариосистем производится как минимум в трёх положениях компонентов (исходном, промежуточном и крайнем) на основе расчёта искажений амплитудно-фазового распределения поля и отклонений пространственных параметров выходного лазерного пучка с использованием метода лучевого пакета и дифракционной теории аберраций [9, 35–39].

Расчёт параметров оптической системы для формирования выходной перетяжки лазерного пучка переменного диаметра в пространстве перетяжки материала или перемещения в пространстве перетяжки малого размера рассмотрен в [10, 11]. Такие лазерные вариосистемы позволяют создавать высокоэффективные установки для резки, сварки, упрочнения, снятия напряжений и дислокаций и т.п. Лазерные вариосистемы – основа 3D лазерных принтеров для выращивания деталей произвольной формы. Такие принтеры позволяют изготавливать детали с изменением состава материала по их высоте, что позволяет сочетать на разных участках одной детали уникальные, обычно несочетаемые свойства – гибкость, твердость, износостойкость и др.

Лазерные пучки с изменяемыми пространственными параметрами в широких пределах, как правило, формируют внешней (вне резонатора лазера) оптической вариосистемой высокой кратности. Такая лазерная оптическая система, удовлетворяющая всем требованиям (габаритным, оптическим, конструкторско-технологическим), имеет сложную структуру. Упростить оптический блок таких лазерных систем можно путём перераспределения требуемого перепада увеличения M на оптическую систему резонатора ($M_{РЕЗ}$) и внешнюю (вне резонатора лазера) оптическую систему ($M_{ЛОС}$) таким образом, чтобы $M = M_{РЕЗ}M_{ЛОС}$.

Габаритный расчёт резонаторов твердотельных лазеров, формирующих Гауссов пучок с изменяемыми пространственными параметрами при неизменности энергетических параметров излучения, рассмотрен в [45].

4. Примеры разработок вариосистем

Ниже рассмотрены примеры разработки вариосистем различного назначения [16–23].

На рис. 2 представлены 3D-модель конструкции и структура оптической схемы компактного вариообъектива, работающего в сверхшироком диапазоне ИК-области спектра (0,9...1,7 мкм) и обеспечивающего высокое угловое разрешение и большую кратность изменения фокусного расстояния объектива: 18–300 мм. Подвижными являются 2-я, 3-я и 4-я группы оптической системы.

Компенсация термооптических аберраций вариообъектива в широком диапазоне температур ($\Delta t = 100^\circ\text{C}$) осуществляется смещением линз 4-й группы. Эффективность компенсации термооптических аберраций вариообъектива проиллюстрирована

на рис. 3, где показаны графики модуля передаточной функции до и после компенсации.

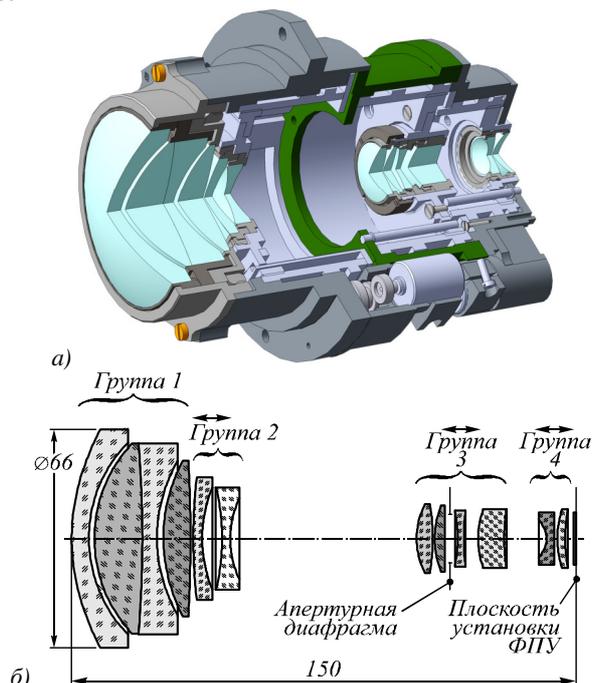


Рис. 2. Вариообъектив ИК-области спектра: 3D-модель (а), схема оптической системы (б)

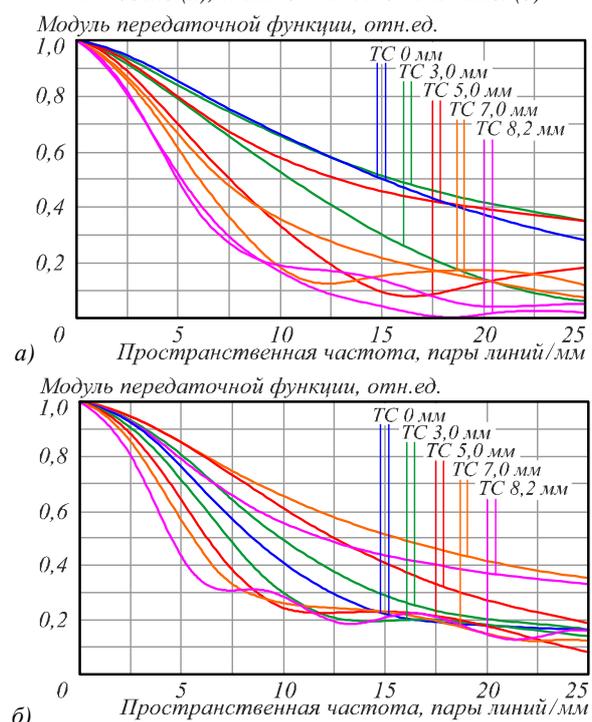


Рис. 3. Графики модуля передаточной функции: $t = 60^\circ\text{C}$ (без компенсации термооптических аберраций) (а); $t = 60^\circ\text{C}$ (после компенсации термооптических аберраций) (б)

Для дополнительной проверки качества разработанного вариообъектива (помимо расчёта МПФ) проведено численное моделирование с расчётом изображения протяжённого тестового объекта с деталями, угловой размер которых соответствует требуемой величине углового разрешения. На рис. 4

представлены результаты моделирования разработанного вариообъектива по изображению протяженного объекта. На рис. 4а представлен тестовый объект, а на рис. 4б – его изображение вариообъективом при размере пикселя 12 мкм. Результаты такой проверки подтверждают разрешение и качество ИК-вариообъектива.

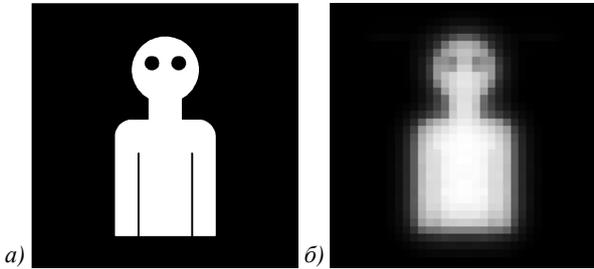


Рис. 4. Результаты моделирования качества вариообъектива по изображению протяжённого объекта: тестовый объект (а); изображение тестового объекта на детекторе для телепозиции (пиксель 12 мкм) (б)

Аналогичный вариообъектив, разработанный для видимой области спектра, имеет угловое разрешение менее 10" и работает на матрицу с размером пикселя около 2 мкм.

На рис. 5 показаны результаты разработки компактного вариообъектива 10× [46]. Вариообъектив имеет складную конструкцию с толщиной 14 мм в нерабочем собранном состоянии, что позволяет монтировать его в корпус мобильного телефона.

По сравнению с вариообъективами 10× ведущих мировых компаний для компактных камер (Lumix DMC-TZ4, Lumix DMC-TZ5, Pentax Optio V10) схема данного вариообъектива при лучшем качестве изображения имеет на 2 линзы меньше и лишь 2 асферические поверхности (у аналогов 3...4). Длина объектива в рабочем состоянии меньше, чем у аналогов, в 2 раза.

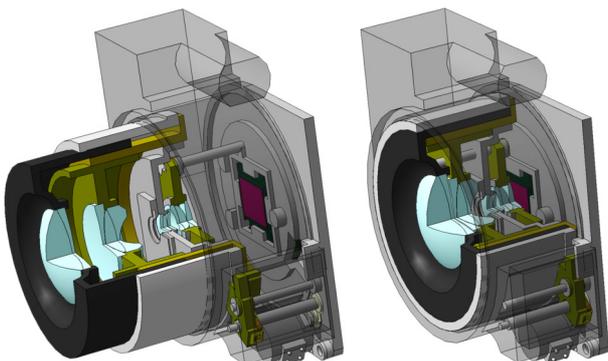


Рис. 5. Общий вид компактного вариообъектива 10× (справа – схема в сложенном положении)

В качестве примера разработки лазерных вариосистем на рис. 6 приведены результаты разработки системы для перемещения на большое расстояние сфокусированного пятна мощного лазера. На рис. 6а представлено распределение плотности мощности в поперечном сечении исходного лазерного пучка и результаты изменения диаметра сфокусированного лазерного пучка от расстояния между компонентами

вариообъектива (рис. 6б). При угловом сканировании лазерного пучка в пределах ±30' диаметр фокального пятна остается постоянным.

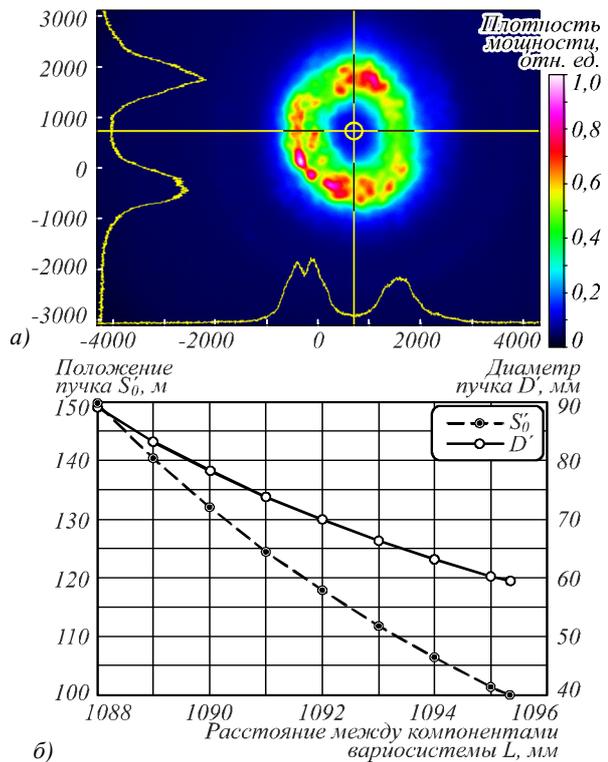


Рис. 6. Поперечное сечение лазерного пучка (а); зависимости изменений положения (S_0) и диаметра (D') выходного пучка от расстояния между компонентами вариообъектива (L) (б)

На рис. 7 представлена оптическая схема компактного вариообъектива видимого диапазона спектра (0,4...0,7 мкм) с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний: 5,7 – 172 мм.

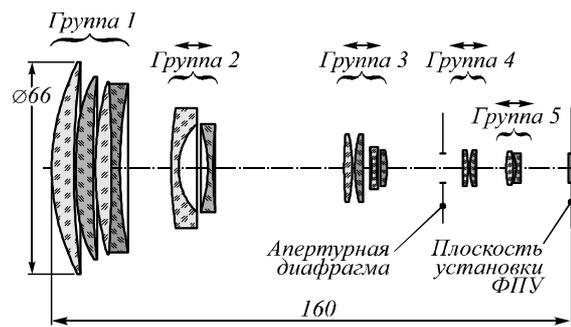


Рис. 7. Схема вариообъектива видимого спектра для среднего положения

Объектив обеспечивает высокое качество изображения – коэффициент передачи модуляции на частоте 150 л/мм составляет не менее 30 % для всех 6 рассчитанных положений компонентов. Длина вариообъектива от первой поверхности до приёмника – 160 мм. При этом падение освещённости по полю не превышает 20 % в широкоугольной позиции, а на большей части диапазона фокусных расстояний – менее 5 %. Дисторсия – менее 3,5 %.

Заклучение

Работа научной школы «Разработка вариосистем» МГТУ им. Н.Э. Баумана базируется на разработке и применении различных математических моделей работы вариосистем, создании методик, алгоритмов и программного обеспечения для компьютерного автоматизированного проектирования вариосистем, начиная с габаритного синтеза (с определением наилучшей структурной схемы), абберрационного синтеза и заканчивая расчётом допусков на оптическую систему, включая их перебалансировку при учёте технологических возможностей конкретного изготовителя.

Подход и сам процесс компьютерной разработки вариосистем различного назначения отличается комплексностью: создается не только рабочая конструкторская документация на оптику, механику и электронный контроллер с интерфейсом управления вариосистемой; изготавливается образец, программа и методика его контроля и испытаний. Разработанные вариосистемы имеют практически предельные или близкие к ним оптические параметры и характеристики.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ поддержки молодых российских учёных (№ МК-6960.2016.8).

Литература

1. **Barlow, P.** On the principle of construction and general application of the negative achromatic lens to telescopes and eyepieces of every description / P. Barlow // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1834. – Vol. 124. – P. 205-207.
2. **US Patent 696788 G 02 B 15/14.** Optical objective / C.C. Allen, filed of February 25, 1901, published of April 1, 1902.
3. **Warmisham, A.** The Bell & Howell Cooke varo lens / A. Warmisham, R.F. Mitchell // *Journal of the Society of Motion Picture Engineers*. – 1932. – Vol. 19, Issue 4. – P. 329-339. – DOI: 10.5594/J05480.
4. **Patent US 4019073 H 01 L 41/09, H 02 N 2/12, 310/322.** Piezoelectric motor structures / V.S. Vishnevsky, V.L. Kaversev., I.A. Kartashev, V.V. Lavrinenko, M.M. Nekrasov, A.A. Prez, filed of August 12, 1975, published of April 19, 1977.
5. **Грейсух, Г.И.** Моделирование и исследование суперроматизации рефракционных и рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, А.В. Калашников, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 395-404.
6. **Грейсух, Г.И.** Расчёт и анализ компактного пластмассоволинзового рефракционно-дифракционного вариообъектива / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 208-214.
7. **Пахомов, И.И.** Панкратические системы / И.И. Пахомов – М.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
8. **Пахомов, И.И.** Оптико-электронные квантовые приборы / И.И. Пахомов, О.В. Рожков, В.Н. Рождествен; под ред. И.И. Пахомова. – М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
9. **Пахомов, И.И.** Расчёт оптических систем лазерных приборов / И.И. Пахомов, А.Б. Цибуля. – М.: Радио и связь, 1986. – 150 с.
10. **Пат. 2488861 Российская Федерация G 02 B 27/09, H 01 S 3/10.** Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера / Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Носов П.А., Ширанков А.Ф., Хорохоров А.М., Павлов В.Ю., Третьяков Р.С., Ставертий А.Я., Голубенко Ю.В.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ им. Н.Э. Баумана); № 2012127195/28, заявл. 29.06.2012, опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21. – 10 с.: ил.
11. **Пат. 2411598 Российская Федерация G 11 B 7/125, G 02 F 1/29, H 01 S 3/10.** Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка / Ширанков А.Ф., Пахомов И.И., Иванов В.А., Аниканов А.Г., Штыков С.А., Носов П.А., Павлов В.Ю.; заявитель и правообладатель Корпорация «Самсунг Электроникс Ко., Лтд.»; № 2008145227/28, заявл. 18.11.2008, опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 11 с.: ил.
12. **Пахомов, И.И.** Расчёт двухкомпонентных систем переменного увеличения // *Оптико-механическая промышленность*. – 1981. – № 5. – С. 15-19.
13. **Пахомов, И.И.** Трёхкомпонентные панкратические системы с механической компенсацией // *Оптико-механическая промышленность*. – 1982. – № 6. – С. 22-25.
14. **Пахомов, И.И.** Автоматизированный габаритный расчёт вариообъективов / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. – 2010. – № 3(80). – С. 26-41.
15. **Пахомов, И.И.** Автоматизированный габаритный расчёт вариообъективов / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, М.Е. Фролов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // *Прикладная оптика-2010: Сборник трудов IX Международной конференции*. – 2010. – Т. 2, часть II. – С. 316-320.
16. **European Patent EP1400827 G 02 B 13/00, G 02 B 13/18, G 02 B 27/18, H 04 N 5/74, G 02 B 3/02, G 02 B 13/18.** Aspherical lens and video projector / Hwang G.-H., Khorokhorov A.M., Pozdnyakov V.V., Rozhkov O.V., Shirankov A.F., Yoon S.-I.; EP20030254158, filed of June 30, 2003, published on March 24, 2004.
17. **Патент 2227314 Российская Федерация G 02 B 27/18, H 04 N 5/74.** Оптическая система проекционного телевизора / Рожков О.В., Ширанков А.Ф., Хорохоров А.М., Поздняков В.В.; правообладатель Самсунг Электроникс Ко., Лтд., Научно-учебный комплекс радиоэлектроники, лазерной и медицинской техники при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана; заявл. 17.09.2002, опубл. 20.04.2004, Бюл. №11.
18. **Вереникина, Н.М.** Трёхкратный вариообъектив для сверхкомпактной пятимегапиксельной фотокамеры / Н.М. Вереникина, А.Ф. Ширанков, О.В. Рожков // *Прикладная оптика: Сборник трудов VII Международной конференции*. – 2006. – Т. 1. – С. 293-296.
19. **U.S. Patent 2004114057 G 02 B 3/02, G 02 B 13/18, H 04 N 5/74, G 02 B 27/18, G 02 B 13/00, 348/744.** Hybrid lens and projection optical system including the same / S.-I. Yoon, G.-H. Hwang, A.F. Shirankov, O.V. Rozhkov, V.V. Pozdnyakov, A.M. Khorokhorov, filed of September 17, 2003, published of June 17, 2004.
20. **CN Patent 1484059 (A) G 02 B 3/02, G 02 B 13/18, H 04 N 5/74, G 02 B 27/18, G 02 B 13/00.** Combined lens and projection optical system having same / S.-I. Yoon, G.-H. Hwang, A.F. Shirankov, O.V. Rozhkov, V.V. Pozdnyakov, A.M. Khorokhorov, filed of June 26, 2003, published of March 24, 2004.

21. **Пахомов, И.И.** Применение методики автоматизированного габаритного и абберационного синтеза к расчёту четырёхкратного вариообъектива / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров // Прикладная оптика: Сборник трудов X Международной конференции. – 2012. – Т. 1. – С. 62-66.
22. **Пискунов, Д.Е.** Абберационный синтез широкоугольного светосильного проекционного объектива видеопроектора / Д.Е. Пискунов, М.В. Попов, А.М. Хорохоров // Прикладная оптика: Сборник трудов X Международной конференции. – 2012. – Т. 3. – С. 35-39.
23. **Патент 2510067 Российская Федерация G 03 B 21/10, G 02 B 27/18, H 04 N 5/74.** Проекционная оптическая система / Пискунов Д.Е.; правообладатель Корпорация "Самсунг Электроникс Ко., Лтд."; № 2012123521/28, заявл. 07.06.2012, опубл. 20.03.2014, Бюл. № 8. – 20 с.: ил.
24. **Пахомов, И.И.** Численный метод расчёта систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных компонентов / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2012. – Спец. вып. № 8. – С. 25-35.
25. **Пахомов, И.И.** Расчёт систем переменного увеличения с произвольным количеством подвижных групп / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров // Прикладная оптика: Сборник трудов X Международной конференции. – 2012. – Т. 1. – С. 57-61.
26. **Пискунов, Д.Е.** Современные методы расчёта вариообъективов [Электронный ресурс] / Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 9. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/927.html>. – DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-927.
27. **Пискунов, Д.Е.** Методика синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Пискунов Дмитрий Евгеньевич. – М., 2013. – 175 с.
28. **Пискунов, Д.Е.** Методика автоматизированного синтеза вариообъективов в области аббераций третьего и пятого порядков / Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2012. – Спец. вып. № 8. – С. 36-52.
29. **Пахомов, И.И.** Автоматизированный абберационный синтез объективов / И.И. Пахомов, Д.Е. Пискунов, М.Е. Фролов, А.М. Хорохоров, А.Ф. Ширанков // Прикладная оптика: Сборник трудов IX Международной конференции. – 2010. – Т. 2. – С. 279-282.
30. **Пискунов, Д.Е.** Аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем [Электронный ресурс] / Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. – 2012. – № 7. – С. 153-162. – URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/442505.html> (дата обращения 15.07.2017). – DOI: 10.7463/0712.0442505.
31. **Пискунов, Д.Е.** Метод расчёта оптических систем, состоящих из произвольного количества компонентов / Д.Е. Пискунов, А.М. Хорохоров // Естественные и технические науки. – 2012. – № 4. – С. 236-240.
32. **Хемминг, Р.В.** Численные методы для научных работников и инженеров: Пер. с англ. / Р.В. Хемминг. – М.: Наука, 1972. – 400 с. – ISBN: 978-5-458-33613-0.
33. **Пахомов, И.И.** Использование полиномов Чебышева для синтеза и оптимизации оптических систем / И.И. Пахомов, А.М. Хорохоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 1995. – № 3. – С. 69-73.
34. **Ананьев, Ю.А.** Оптические резонаторы и лазерные пучки / Ю.А. Ананьев. – М.: Наука, 1990. – 264 с. – ISBN: 5-02-014363-4.
35. **Климков, Ю.М.** Прикладная лазерная оптика / Ю.М. Климков. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
36. **Мандель, Л.** Оптическая когерентность и квантовая оптика / Л. Мандель, Э. Вольф. – Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2000. – 896 с. – ISBN: 5-9221-0073-4.
37. **Аниканов, А.Г.** Структурный синтез лазерных оптических систем при ограничениях их параметров / А.Г. Аниканов, И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 2. – С. 30-36.
38. **Пахомов, И.И.** Описание, расчёт и анализ искажений многомодовых лазерных пучков / И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков, П.А. Носов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 2. – С. 37-43.
39. **Носов, П.А.** Абберационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков / П.А. Носов, В.Ю. Павлов, И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 34-44.
40. **Исаевич, А.В.** Установка для определения пространственных характеристик лазерного излучения / А.В. Исаевич, А.В. Холенков // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 10. – С. 67-73.
41. **Nosov, P.A.** Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam / P.A. Nosov, A.F. Shirankov, A.G. Grigoryants, R.S. Tretyakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 584(1). – 012006. – DOI: 10.1088/1742-6596/584/1/012006.
42. **Pakhomov, I.I.** Analysis and synthesis of laser cavities / I.I. Pakhomov, P.A. Nosov // Journal of Russian Laser Research. – 2012. – Volume 33, Issue 5. – P. 409-423. – DOI: 10.1007/s10946-012-9297-4.
43. **Nosov, P.A.** Analysis of multielement laser cavities of an arbitrary configuration / P.A. Nosov, I.I. Pakhomov, A.F. Shirankov // Physics of Wave Phenomena. – 2011. – Vol. 19, Issue 3. – P. 202-209. – DOI: 10.3103/S1541308X11030071.
44. **Носов, П.А.** Анализ и синтез зеркально-линзовых резонаторов / П.А. Носов, И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 1. – С. 28-35.
45. **Носов, П.А.** Резонаторы твердотельных лазеров для изменения пространственных параметров пучка / П.А. Носов, В.И. Батшев // Прикладная физика. – 2017. – № 1. – С. 51-57.
46. **Патент 2433434 Российская Федерация G 02 B 15/16, G 02 B 15/22.** Десятикратный ультракомпактный вариообъектив с макрорежимом / Ширанков А.Ф., Павлов В.Ю., Штыков С.А., Рожков О.В., Полкунов В.А., Юн Я.К., Канг В.-К.; правообладатель Корпорация "Самсунг Электроникс Ко., Лтд.", Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана); № 2010101847/28, заявл. 21.01.2010, опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. – 10 с.: ил.

Сведения об авторах

Рожков Олег Владимирович, 1938 года рождения, окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, член Оптического общества им. Д.С. Рождественского и национального отделения Международного общества по оптической технике SPIE/RUS. Автор более 150 научных работ в области расчёта оптических систем, оптической обработки изображений методами фурье-оптики и цифровой оптоэлектроники.

Пискунов Дмитрий Евгеньевич, 1985 года рождения, в 2008 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 20 работ в области проектирования оптических систем. E-mail: piskunovde@gmail.com.

Носов Павел Анатольевич, 1984 года рождения, в 2007 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 30 работ в области лазерной оптики. E-mail: pan@bmstu.ru.

Павлов Виктор Юрьевич, 1984 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 году, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование оптических систем.

Хорохов Алексей Михайлович, 1945 года рождения, окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры Лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области оптико-электронного приборостроения. E-mail: a.horohorov@yandex.ru.

Ширанков Александр Фёдорович, 1950 года рождения, окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Кандидат технических наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники за 1981 г. Автор более 100 научных работ в области оптики и лазерной техники. E-mail: ashirankov@mail.ru.

ГРНТИ: 29.31.29, 47.35.31

Поступила в редакцию 19 июля 2017 г. Окончательный вариант – 30 сентября 2017 г.

BAUMAN MSTU SCIENTIFIC SCHOOL “ZOOM LENS DESIGN”: FEATURES OF THEORY AND PRACTICE

O.V. Rozhkov¹, D.E. Piskunov¹, P.A. Nosov¹, V.Yu. Pavlov¹, A.M. Khorokhorov¹, A.F. Shirankov¹
¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

Key theoretical concepts advanced by the Bauman MSTU scientific school 'Zoom lens design' are discussed. These include methods for design of both classical and laser zoom lenses, systems with linear and nonlinear relations between the displacements of components, basics of professor I. I. Pakhomov's theory of generalized parameters, a method of paraxial synthesis of multi-component zoom systems, a method of aberration synthesis of zoom systems in the approximation of the third- and fifth-order aberrations. The effectiveness of the described methods is illustrated by examples of designing zoom systems with superior optical characteristics.

Keywords: optical system, zoom lens, pancratic system, varifocal system, automated design, structural layout, generalized parameters, Chebyshev fractions, Chebyshev polynomials, aberrations, resolution of zoom lens.

Citation: Rozhkov OV, Piskunov DE, Nosov PA, Pavlov VYu, Khorokhorov AM, Shirankov AF. Bauman MSTU scientific school “Zoom lens design”: features of theory and practice. *Computer Optics* 2018; 42(1): 72-83. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-72-83.

Acknowledgements: The work was partially funded by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – PhD, Project No. MK-6960.2016.8.

References

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Barlow, P. On the principle of construction and general application of the negative achromatic lens to telescopes and eyepieces of every description / P. Barlow // <i>Philosophical Transactions of the Royal Society of London</i>. – 1834. – Vol. 124. – P. 205-207.</p> <p>[2] Allen CC. Optical objective. Patent US N696788, filed of February 25, 1901, published of April 1, 1902.</p> <p>[3] Warmisham A, Mitchell RF. The Bell & Howell Cooke varo lens. <i>J SMPE</i> 1932; 19(4): 329-339. DOI: 10.5594/J05480.</p> <p>[4] Vishnevsky VS, Kavertsev VL, Kartashev IA, Lavrinenko VV, Nekrasov MM, Prez AA. Piezoelectric motor structures. Pat US 4019073, filed of August 12, 1975, published of April 19, 1977.</p> | <p>[5] Greysukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Modeling and investigation superchromatization refractive and refractive-diffractive optical systems [In Russian]. <i>Computer Optics</i> 2012; 36(3): 395-404.</p> <p>[6] Greysukh GI, Ezhov EG, Sidiyakina ZA, Stepanov SA. Design and analysis of the compact plastic refractive-diffractive zoom lens [In Russian]. <i>Computer Optics</i> 2013; 37(2): 208-214.</p> <p>[7] Pakhomov II. Zoom systems [In Russian]. Moscow, “Mashinostroenie” Publisher; 1976.</p> <p>[8] Pakhomov II, Rozhkov OV, Rozhdestvin VN. Optoelectronic quantum devices [In Russian]. Moscow: “Radio i Svyaz” Publisher; 1982.</p> <p>[9] Pakhomov II, Tsibulya AB. Calculation of the optical systems of laser devices [In Russian]. Moscow: “Radio i Svyaz” Publisher; 1986.</p> |
|---|---|

- [10] Pakhomov II, Grigor'jants AG, Nosov PA, Shirankov AF, Khorokhorov AM, Pavlov VJu, Tret'jakov RS, Stavertij AJa, Golubenko JuV. Method of varying neck diameter of output laser beam at fixed distance from laser [In Russian]. Pat RF of Invent N 2488861 of July 27, 2013, Russian Bull of Inventions N 21, 2013.
- [11] Shirankov AF, Pakhomov II, Ivanov VA, Anikanov AG, Shtykov SA, Nosov PA, Pavlov VJu. Method and device for moving laser beam neck [In Russian]. Pat RF of Invent N 2411598 of February 02, 2011, Russian Bull of Inventions N4, 2011.
- [12] Pakhomov II. Calculation of two-component systems of variable magnification [In Russian]. Optical-mechanical industry 1981, 5: 15-19.
- [13] Pakhomov II. Three-component pancratic systems with mechanical compensation [In Russian]. Optical-mechanical industry 1982, 6: 22-25.
- [14] Pakhomov II, Piskunov DE, Khorokhorov AM, Shirankov AF. Automated paraxial zoom lens design [In Russian]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering 2010; 3(80): 26-41.
- [15] Pakhomov II, Piskunov DE, Frolov ME, Khorokhorov AM, Shirankov AF. Automated paraxial zoom lens design [In Russian]. Applied Optics-2010: Proceedings of IX International Conference 2010; 2(II): 316-320.
- [16] Hwang G-H, Khorokhorov AM, Pozdnyakov VV, Rozhkov OV, Shirankov AF, Yoon S-I. Aspherical lens and video projector. European Patent EP1400827 of March 24, 2004.
- [17] Rozhkov OV, Shirankov AF, Khorokhorov AM, Pozdnyakov VV. Optical system the projection TV [In Russian]. Pat RF of Invent N 2227314 of April 20, 2004, Russian Bull of Inventions N11, 2004.
- [18] Verenikina NM, Shirankov AF, Rozhkov OV. Three-fold zoom lens for ultra-compact 5 MPix camera [In Russian]. Applied Optics-2006: Proceedings of VII International Conference 2006; 1: 293-296.
- [19] Yoon S-I, Hwang G-H, Shirankov AF, Rozhkov OV, Pozdnyakov VV, Khorokhorov AM. Hibrid lens & projection optical system including the same. Pat US 2004114057 of June 17, 2004.
- [20] Seok-il Y, Gyu-hwan H, Shirankov AF, Rozhkov OV, Pozdnyakov VV, Khorokhorov AM. Combined lens and projection optical system having same. Pat CN 1484059 (A) of March 24, 2004.
- [21] Pakhomov II, Piskunov DE, Khorokhorov AM. Application of automated paraxial and aberration synthesis technique to the design of 4x zoom lens [In Russian]. Applied Optics-2012: Proceedings of X International Conference 2012; 1: 62-66.
- [22] Piskunov DE, Popov MV, Khorokhorov AM. Aberration synthesis of a wide-angle high-speed projection video projector lens [In Russian]. Applied Optics-2012: Proceedings of X International Conference 2012; 3: 35-39.
- [23] Piskunov DE. Optical projection system [In Russian]. Pat RF of invent N 2510067 of March 20, 2014, Russian Bull of Inventions N8, 2014.
- [24] Pakhomov II, Piskunov DE, Khorokhorov. A numerical method for calculating zoom lens systems with an arbitrary number of moving components [In Russian]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering Series 2012; 8(special): 25-35.
- [25] Pakhomov II, Piskunov DE, Khorokhorov AM. Design of zoom lens systems with an arbitrary number of moving groups [In Russian]. Applied Optics-2012: Proceedings of X International Conference 2012; 1: 57-61.
- [26] Piskunov DE, Khorokhorov AM, Shirankov AF. Up-to-date methods of zoom lens design [In Russian]. Engineering Journal: Science and Innovation 2013; 9. Source: (<http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/927.html>).
- [27] Piskunov DE. Method of design of high quality zoom lens systems with arbitrary number of moving groups. The thesis for the Candidate's degree in Technical Sciences. Moscow; 2013.
- [28] Piskunov DE, Khorokhorov, Shirankov AF. Method of automated synthesis of zoom lenses in the купшшт of third and fifth order aberrations [In Russian]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering Series 2012; 8(special): 36-52.
- [29] Pakhomov II, Piskunov DE, Frolov ME, Khorokhorov AM, Shirankov AF. Automated aberration zoom lens design [In Russian]. Applied Optics-2010: Proceedings of IX International Conference 2010; 2: 279-282.
- [30] Piskunov DE, Khorokhorov AM. Analytical and optimization method of aberration synthesis in optical systems [In Russian]. Science and Education. Scientific edition of Bauman MSTU 2012; 7: 153-162. Source: (<http://old.technomag.edu.ru/doc/442505.html>). DOI: 10.7463/0712.0442505.
- [31] Piskunov DE, Khorokhorov AM. The method of calculating optical systems consisting of an arbitrary number of components [In Russian]. Natural and Technical Sciences 2012; 4: 236-240.
- [32] Hamming RW. Numerical methods for scientists and engineers. 2nd ed. New York: Dover Publications, Inc.; 1986. ISBN: 978-0-486-65241-2.
- [33] Pakhomov II, Khorokhorov AM. Chebyshev polynomials for synthesis and optimization of optical systems [In Russian]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering Series 1995; 3: 69-73.
- [34] Anan'ev YuA. Optical cavities and laser beams [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1990. ISBN: 5-02-014363-4.
- [35] Klimkov YuM. Applied laser optics [In Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1985.
- [36] Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge University Press; 1995. ISBN: 0-521-41711-2.
- [37] Anikanov AG, Pakhomov II, Shirankov AF. Structural synthesis of laser optical systems when their parameters are restricted. J Opt Techn 2010; 77(2): 101-106. DOI: 10.1364/JOT.77.000101.
- [38] Pakhomov II, Shirankov AF, Nosov PA. Description, calculation, and analysis of the distortions of multimode laser beams. J Opt Techn 2010; 77(2): 107-112. DOI: 10.1364/JOT.77.000107.
- [39] Nosov PA, Pavlov VYu, Pakhomov II, Shirankov AF. Aberrational synthesis of optical systems intended for the conversion of laser beams. J Opt Techn 2011; 78(9): 586-593. DOI: 10.1364/JOT.78.000586.
- [40] Isaevich AV, Kholenkov AV. Apparatus for determining the spatial characteristics of laser radiation. J Opt Techn 2011; 78(10): 687-691. DOI: 10.1364/JOT.78.000687.
- [41] Nosov PA, Shirankov AF, Grigoryants AG, Tret'jakov RS. Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam. Journal of Physics: Conference Series 2015; 584(1): 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/584/1/012006.
- [42] Pakhomov II, Nosov PA. Analysis and synthesis of laser cavities. Journal of Russian Laser Research 2012; 33(5): 409-423. DOI: 10.1007/s10946-012-9297-4.
- [43] Nosov PA, Pakhomov II, Shirankov AF. Analysis of multi-element laser cavities of an arbitrary configuration.

- Physics of Wave Phenomena 2011; 19(3): 202-209. DOI: 10.3103/S1541308X11030071.
- [44] Nosov PA, Pakhomov II, Shirankov AF. Analysis and synthesis of mirror-lens cavities. J Opt Techn 2010; 77(1): 21-27. DOI: 10.1364/JOT.77.000021.
- [45] Nosov PA, Batshev VI. Solid-state laser resonators for varying spatial beam parameters [In Russian]. Applied Physics 2017; 1: 51-57.
- [46] Shirankov AF, Pavlov VYu, Shtykov SA, Rozhkov OV, Polkunov VA, Yun YK, Kang VK. Ten-fold ultra-compact varifocal lens with macro-mode [In Russian]. Pat RF of Invent N 2433434 of November 10, 2011, Russian Bull of Inventions N31, 2011.

Author's information

Oleg Vladimirovich Rozhkov (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. D. Sc. (Eng.), professor, member of the Optical Society named after D.S. Rozhdestvensky and of SPIE Russian section. Author of over 150 scientific publications in the field of optical systems calculation, optical image processing with the use of methods of Fourier-optics and digital optoelectronics.

Dmitry Evgenevich Piskunov (b. 1985) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2008. PhD(Eng.), associate professor of Laser and Optoelectronic Systems department of Bauman Moscow State Technical University, author of more than 20 publications in the field of optical systems design. E-mail: piskunovde@gmail.com.

Pavel Anatolievich Nosov (b. 1984) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007, PhD(Eng.), associate professor of Laser and Optoelectronic Systems department of Bauman Moscow State Technical University, author of over 30 publications in the field of laser optics. E-mail: pan@bmstu.ru.

Viktor Yurievich Pavlov (b. 1984) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2007. Research scientist in the Research Institute for Radio Electronics and Laser Technology of Bauman Moscow State Technical University. Area of scientific interests is optical systems design.

Alexey Mikhailovich Khorokhorov (b. 1945) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), senior researcher, associate professor of the Laser and Optoelectronic Systems department of Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of optical-and-electronic instrument engineering. E-mail: a.horokhorov@yandex.ru.

Alexander Fyodorovich Shirankov (b. 1950) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph.D. (Eng.), head of department in the Research Institute for Radio Electronics and Laser Technology of Bauman Moscow State Technical University. Winner of Lenin Komsomol Prize in the field of science and technology. Author of over 100 publications in the field of optics and laser technology. E-mail: ashirankov@mail.ru.

Received July 19, 2017. The final version – September 30, 2017.
