

УДК 535.816

И. И. Пахомов, А. С. Севрюгин

РАСЧЕТ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Рассмотрен расчет лазерных систем переменного увеличения. Предложен метод расчета лазерных систем переменного увеличения, позволяющий получить большое число вариантов оптических схем (решений) для заданного набора исходных данных. Предложены правила отбора решений. Приведен пример расчета панкратического объектива для фокусировки лазерного излучения.

Область применения лазерных систем переменного увеличения. Достоинством оптических систем переменного увеличения, широко используемых в настоящее время в различных приборах и устройствах, является их универсальность. Как следует из их названия, они предназначены для изменения (непрерывного или дискретного) основных оптических параметров системы, таких как линейное увеличение, числовая апертура, фокусное расстояние и др. Особый интерес представляют панкратические системы, осуществляющие непрерывное изменение этих параметров в заданном диапазоне. Эти системы наиболее универсальны, поскольку каждая из них позволяет получить параметры, свойственные в отдельности целому набору различных оптических систем.

Область применения лазерных систем переменного увеличения весьма широка. При решении многих задач в лазерной локации и дальнометрии, оптических исследованиях и измерениях необходимо иметь возможность изменять характеристики лазерного (гауссова) пучка, такие как параметр конфокальности Z_k , угол расходимости 2Θ и радиус $r_{1/e}$ в заданном сечении формируемого пучка.

В лазерных локаторах, лазерных системах видения и дальнометрах важно сфокусировать лазерный пучок на исследуемом или сопровождаемом объекте, обеспечив определенную плотность мощности и расходимость зондирующего пучка. В лазерных коллиматорах обычно требуется преобразовать исходный пучок с малой величиной параметра конфокальности в широкий коллимированный пучок. Эти задачи также решаются с помощью лазерной системы переменного увеличения.

В лазерных технологических установках, используемых для обработки материалов, для изменения параметров обрабатываемого лазерного пучка традиционно используются различные сменные оптические насадки, позволяющие изменять положение плоскости обработки, а также диаметр лазерного пучка в плоскости обработки. Все дополнительные оптические насадки могут быть заменены одной лазерной панкратической системой, осуществляющей непрерывное изменение параметров лазерного пучка в зоне обработки.

При расчете лазерных панкратических систем учитывается наличие или отсутствие данных о параметрах лазерного пучка на входе в рассматриваемую оптическую систему. Как известно, лазерный пучок, соответствующий низшей гауссовой моде устойчивого лазерного резонатора, может быть полностью задан тремя параметрами — длиной волны излучения лазера λ , величиной параметра конфокальности Z_K и положением сечения перетяжки (например, относительно выходного зеркала резонатора). Все эти параметры легко рассчитать при известных конструктивных параметрах резонатора лазера.

К сожалению, в большинстве работ лазерный источник излучения рассматривается как отдельный элемент, не связанный с последующей оптической системой, и в технической документации лазера конструктивные параметры резонатора не указываются. Это не позволяет рассчитать параметры пучка, формируемого резонатором, и затрудняет расчет его дальнейшего преобразования оптической системой. Кроме этого, отсутствие данных о лазерном источнике часто приводит к усложнению расчетов, неоправданному возрастанию сложности оптической системы (увеличению числа компонентов) и завышению требований к мощности лазера. Например, для лазерной технологии необходимо обеспечить высокую удельную плотность мощности в зоне обработки. Этого можно достичь двумя путями — повышением мощности лазера или улучшением фокусировки излучения в зоне обработки. Однако возрастание мощности лазера приводит к непропорциональному увеличению стоимости всей лазерной системы [1]. Получение хорошо сфокусированного пятна при отсутствии данных о параметрах формируемого резонатором лазерного пучка также затруднительно и обычно достигается за счет ввода в оптическую систему дополнительных компонентов. Очевидно, что всех указанных сложностей можно избежать, если использовать менее мощный лазер и оптическую систему с минимальным числом компонентов при том условии, что известны конструктивные параметры резонатора или параметры формируемого им лазерного пучка.

Постановка задачи. Основные формулы. Целью настоящей работы является описание метода расчета лазерных систем переменного увеличения, используемых для непрерывного изменения диаметра выходящего лазерного пучка в заданном неподвижном сечении (плоскости обработки). Очевидно, что для этого необходимо изменять линейное увеличение между плоскостью предмета и плоскостью изображения при условии неподвижности плоскости изображения. Под плоскостью предмета будем понимать некоторое опорное сечение входящего лазерного пучка, а плоскостью изображения будем называть оптически сопряженное с ним опорное сечение выходящего пучка.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением трехкомпонентных линзовых систем переменного увеличения (рис. 1). Известно [2, 3], что для трехкомпонентной системы в параксиальном приближении (при рассмотрении бесконечно тонких оптических компонентов) зависимость величины линейного увеличения β и величины смещения плоскости изображения Δ от перемещения компонентов системы описывается следующими формулами:

$$\beta(f_1, f_2, f_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3) = \frac{f_1 f_2 f_3}{f_1^2(d_2 - s_2 + s_3) - (Z_0 - s_1)(f_2^2 - (d_1 - s_1 + s_2)(d_2 - s_2 + s_3))},$$

$$\Delta(f_1, f_2, f_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3) = Z'(f_1, f_2, f_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3) - Z'_0 + s_3, \quad (1)$$

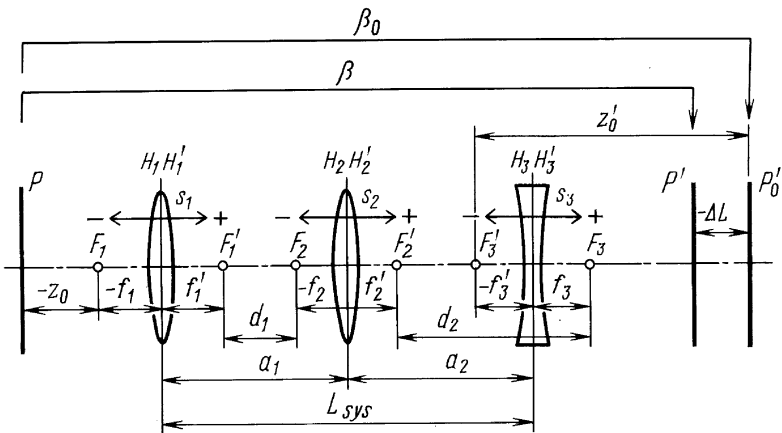


Рис. 1. Трехкомпонентная линзовая система переменного увеличения: P — плоскость предмета; P' — плоскость изображения; P'_0 — начальное положение плоскости изображения; H_i и H'_i , $i = 1, 2, 3$, — передняя и задняя главные плоскости соответственно; F_i и F'_i , $i = 1, 2, 3$, — передний и задний фокусы соответственно; β — линейное увеличение; β_0 — линейное увеличение в начальном положении; L_{sys} — длина системы

где Z_0 — расстояние от переднего фокуса первого компонента до плоскости предмета в начальном положении компонентов системы, f_1 , f_2 и f_3 — задние фокусные расстояния первого, второго и третьего компонентов; d_1 и d_2 — соответственно расстояние между задним фокусом первого и передним фокусом второго компонента и расстояние между задним фокусом второго и передним фокусом третьего компонента в начальном положении компонентов системы (межфокусные расстояния); Z'_0 — расстояние от заднего фокуса третьего компонента до плоскости изображения в начальном положении компонентов системы; s_1 , s_2 и s_3 — величины смещения первого, второго и третьего компонентов относительно начального положения; $Z'(f_1, f_2, f_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3)$ — расстояние от заднего фокуса третьего компонента до плоскости изображения при смещении компонентов на величину s_1 , s_2 и s_3 , определяемое по формуле

$$Z'(f_1, f_2, f_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3) = \frac{f_3^2((d_1 - s_1 + s_2)(Z_0 - s_1) + f_1^2)}{f_1^2(d_2 - s_2 + s_3) - (Z_0 - s_1)(f_2^2 - (d_1 - s_1 + s_2)(d_2 - s_2 + s_3))}. \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда все три компонента системы перемещаются по линейному закону:

$$s_1 = i_1 m, \quad s_2 = i_2 m, \quad s_3 = i_3 m, \quad (3)$$

где i_1 , i_2 и i_3 — коэффициенты, определяющие траекторию движения компонентов; m — переменный параметр, характеризующий величину смещения компонентов (величина $m = 0$ соответствует начальному положению системы).

Тогда, подставляя равенства (3) в выражения (1) с учетом формулы (2), получаем основные формулы для линейного увеличения и смещения плоскости изображения в виде функций от параметра m :

$$\beta(m) = \frac{C}{b_3(m)} = \frac{C}{\sum_{i=0}^3 B_i m^i}, \quad \Delta(m) = \frac{d_4(m)}{b_3(m)} = \frac{\sum_{i=0}^4 D_i m^i}{\sum_{i=0}^3 B_i m^i}, \quad (4)$$

где $b_3(m)$, $d_4(m)$ — многочлены третьей и четвертой степенью относительно m ; $C = f_1 f_2 f_3$; коэффициенты B_i и D_i зависят от i_1 , i_2 , i_3 , f_1 , f_2 , f_3 , d_1 , d_2 , Z_0 и Z'_0 :

$$\begin{aligned}
B_0 &= f_1^2 d_2 - Z_0(f_2^2 - d_1 d_2), \\
B_1 &= f_1 \alpha + Z_0(d_1 \alpha + d_2 \gamma) + i_1(f_2^2 - d_1 d_2), \\
B_2 &= Z_0 \alpha \gamma - i_1(d_1 \alpha + d_2 \gamma), \\
B_3 &= -i_1 \alpha \gamma,
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
D_0 &= f_3^2(d_1 Z_0 + f_1^2) - Z_0'(f_1^2 d_2 - Z_0(f_2^2 - d_1 d_2)), \\
D_1 &= f_3^2(\gamma Z_0 - d_1 i_1) - Z_0'(f_1^2 \alpha + Z_0(d_1 \alpha + d_2 \gamma) + \\
&\quad + i_1(f_2^2 - d_1 d_2)) + i_3(f_1^2 d_2 - Z_0(f_2^2 - d_1 d_2)), \\
D_2 &= -i_1 \gamma f_3^2 - Z_0'(\alpha \gamma Z_0 - i_3(d_1 \alpha + d_2 \gamma)) + \\
&\quad + i_3(f_1^2 \alpha + Z_0(d_1 \alpha + d_2 \gamma) + i_1(f_2^2 - d_1 d_2)), \\
D_3 &= \alpha \gamma i_1 Z_0' + i_3(\alpha \gamma Z_0 - i_3(d_1 \alpha + d_2 \gamma)), \\
D_4 &= -\alpha \gamma i_1 i_3,
\end{aligned} \tag{6}$$

где $\alpha = i_3 - i_2$, $\gamma = i_2 - i_1$.

Метод расчета лазерных систем переменного увеличения для непрерывного изменения диаметра пучка в плоскости изображения. Для непрерывного изменения диаметра пучка в плоскости изображения необходимо обеспечить изменение линейного увеличения в заданном диапазоне, который удобно характеризовать с помощью перепада увеличений M :

$$M = \frac{\beta(m'_2)}{\beta(m'_1)} = \frac{\sum_{i=0}^3 B_i(m'_1)^i}{\sum_{i=0}^3 B_i(m'_2)^i}, \tag{7}$$

причем предполагается, что параметр m изменяется в пределах от m'_1 до m'_2 , т.е. $m_i \in [m'_1, m'_2] \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$, где i — номер текущего положения компонентов системы.

Из формулы (4) очевидно, что для обеспечения неподвижности плоскости изображения для всего интервала $[m'_1, m'_2]$ необходимо выполнение условия

$$d_4(m) = 0 \quad \forall m \in [m'_1, m'_2].$$

Для выполнения этого условия необходимо перемещать один или несколько компонентов оптической системы по нелинейному закону. Можно, однако, потребовать, чтобы это условие выполнялось не для

всех, а лишь для некоторых точек x_1, x_2, \dots, x_N интервала $[m'_1, m'_2]$ при линейном законе перемещения компонентов

$$d_4(m) = 0 \quad \forall m \in \{x_1, x_2, \dots, x_N\}.$$

Поскольку при линейном смещении компонентов числитель во второй из формул (4) является многочленом четвертой степени (при $i_3 \neq 0$), то смещение плоскости изображения можно компенсировать не более чем в четырех точках: x_1, x_2, x_3 и x_4 . Однако поскольку в исходном положении при $m = 0$ смещение плоскости изображения отсутствует, это означает, что одна из четырех точек должна совпадать с нулем. Следовательно, смещение изображения компенсируется в нуле и еще не более чем в трех точках интервала $[m'_1, m'_2]$.

Коэффициенты D_i в левой части системы (6) можно рассчитать по формулам

$$D_0 = \prod_{k=1}^4 x_k, \quad D_1 = -x_1 x_2 x_3 - x_4(x_1 x_2 + (x_1 + x_2)x_3), \quad (8)$$

$$D_2 = x_1 x_2 + (x_1 + x_2)x_3 + x_4 \sum_{k=1}^3 x_k, \quad D_3 = -\sum_{k=1}^4 x_k, \quad D_4 = 1,$$

причем для компенсации смещения плоскости изображения можно выбрать один из многочленов, графики которых изображены на рис. 2 [4, 5].

Рассчитав согласно формулам (8) коэффициенты D_i для требуемых x_1, x_2, x_3 и x_4 и дополнив систему (6) уравнением (7) при заданных i_1, i_3, Z_0, Z'_0 и перепаде увеличений M , получаем систему из шести уравнений относительно неизвестных i_2, f_1, f_2, f_3, d_1 и d_2 .

Таким образом, рассматриваемая задача может быть сформулирована следующим образом: необходимо синтезировать оптическую систему при заданных i_1, i_3, Z_0, Z'_0 , обеспечивающую для $m \in [m'_1, m'_2]$ перепад увеличений, равный M . При этом смещение плоскости изображения от начального положения должно быть скомпенсировано для точек x_1, x_2, x_3 и x_4 интервала $[m'_1, m'_2]$. В результате синтеза необходимо определить значение коэффициента i_2 , величину фокусных расстояний f_1, f_2 и f_3 и межфокальных отрезков d_1 и d_2 .

Решая систему (6), получаем из последнего уравнения этой системы

$$i_{2,1,2} = \frac{i_1 i_3 (i_1 + i_3) \pm \sqrt{i_1 i_3 (i_1 i_3 (i_1 - i_3)^2 + 4)}}{2i_1 i_3}. \quad (9)$$

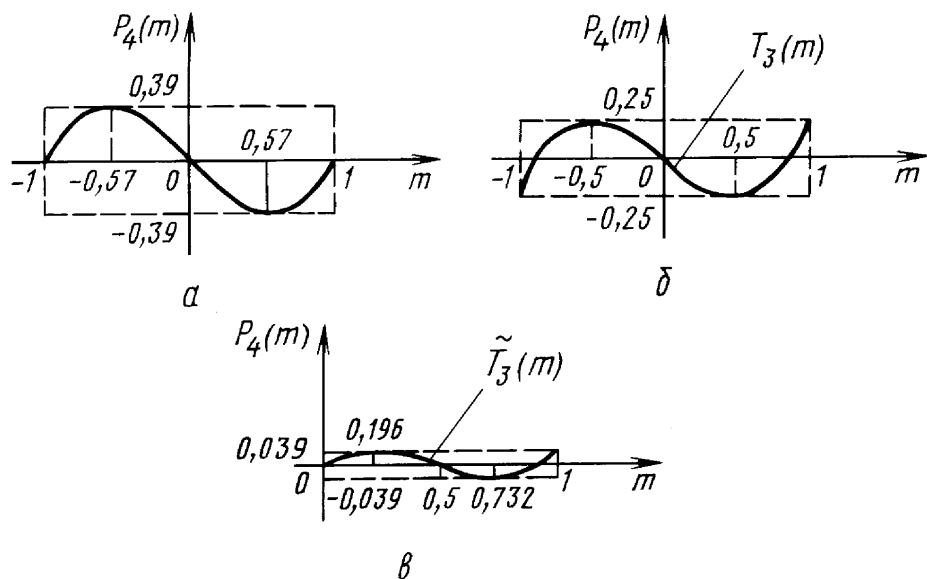


Рис. 2. Примеры графиков многочленов вида $P_4(m) = p_4m^4 + p_3m^3 + p_2m^2 + p_1m + p_0$, используемых для компенсации смещения плоскости изображения:
a — трехточечная компенсация ($p_0 = 0; p_1 = 1; p_2 = 0; p_3 = 1; p_4 = 0$);
б — симметричный нормированный многочлен Чебышева ($p_0 = 0; p_1 = -0,75; p_2 = 0; p_3 = 1; p_4 = 0$);
в — смещенный нормированный многочлен Чебышева ($p_0 = 0; p_1 = 0,4308; p_2 = -1,3943; p_3 = 1; p_4 = 0$)

Тогда, обозначив $\alpha_{1,2} = i_3 - i_{2,1,2}$, $\gamma_{1,2} = i_{2,1,2} - i_1$ и используя остальные уравнения системы (6), приходим к алгебраическому уравнению пятой степени относительно одной переменной d_1 :

$$G_5(d_1) = 0, \quad (10)$$

коэффициенты которого определяются по формуле

$$g = Z_0 Z'_0 c \times b_1 + d \times (Z_0 b_2 + a) - Z'_0 a \times e \times b_1 + f \times b_1 \times b_1, \quad (11)$$

в которой для простоты знаком \times обозначена операция вычисления коэффициентов многочлена, являющегося результатом произведения многочленов-множителей, заданных своими коэффициентами: например, $a_3 \times b_2 = c_5 = (-7 \ 15 \ -29 \ -82 \ 16 \ 12)^T$ для $a_3(x) = 12x^3 + 4x^2 - 2x + 1$, $b_2(x) = x^2 + x - 7$, $a_3(x)b_2(x) = (12x^3 + 4x^2 - 2x + 1)(x^2 + x - 7) = 12x^5 + 16x^4 - 82x^3 - 29x^2 + 15x - 7$.

Коэффициенты многочленов a , b_1 , b_2 , c , d , e и f находятся по формулам

$$a = \begin{pmatrix} k_{19} \\ k_{18} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad b_1 = \begin{pmatrix} k_{17} \\ k_{16} \\ -i_1 k_{13} \end{pmatrix}, \quad b_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ B_{10} \\ B_{11} \\ B_{12} \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned}
c &= \begin{pmatrix} k_{10}k_{19} + k_{12}k_{17} \\ k_{12}k_{16} + k_1k_{17} + k_{10}k_{18} + k_9k_{19} \\ k_{11}k_{17} + k_1k_{16} + k_9k_{18} - i_1k_{12}k_{13} \\ k_{11}k_{16} - i_1k_1k_{13} \\ -i_1k_{11}k_{13} \end{pmatrix}, \\
d &= \begin{pmatrix} k_{14}k_{19} + k_{15}k_{17} \\ k_{15}k_{16} + k_{14}k_{18} + k_{13}k_{19} \\ k_{13}(k_{18} - i_1k_{15}) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\
e &= \begin{pmatrix} k_1 \\ k_{11} \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} -D_0 \\ -Z_0Z'_0E_0 \\ -Z_0Z'_0E_1 \end{pmatrix}, \tag{12}
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
k_1 &= \alpha \left(\frac{Z'_0}{i_3} + \frac{Z_0}{i_1} + D_3 \right), \quad k_2 = -Z'_0 \left(\frac{k_1}{\alpha i_3} + Z_0\alpha\gamma \right) - \frac{Z_0k_1}{\alpha i_1} - D_2, \\
k_3 &= -Z'_0i_1 - i_3Z_0, \quad k_4 = -Z'_0\alpha + i_3k_1, \quad k_5 = \frac{\alpha}{\gamma}k_3, \\
k_6 &= \frac{Z_0Z'_0}{\alpha i_1 i_3}k_1 - D_1, \quad k_7 = -k_1k_3, \\
k_8 &= -Z_0 - i_1m_1 - M(-Z_0 + i_1m_2), \\
k_9 &= \frac{\alpha(M-1)}{\gamma k_8}, \quad k_{10} = \frac{k_1(M-1) + \alpha(Mm_2 - m_1)}{k_8}, \\
k_{11} &= -\frac{\alpha}{\gamma}, \quad k_{12} = -\frac{\gamma}{k_8} \left((Z_0 - i_1m_1)(k_1 + \alpha m_1)m_1 - \right. \\
&\quad \left. - M(Z_0 - i_1m_2)(k_1 + \alpha m_2)m_2 \right), \\
k_{13} &= \frac{i_1k_9}{\gamma}, \quad k_{14} = \frac{i_1i_3k_{10} + \alpha i_3}{i_1\gamma}, \quad k_{15} = \frac{i_1i_3k_{12} + k_2}{i_1\gamma}, \\
k_{16} &= -\frac{\alpha}{\gamma}i_3 + k_3k_9 + \gamma Z_0k_{13} - i_1k_{14}, \quad k_{17} = \gamma Z_0k_{14} + k_4 + k_3k_{10}, \\
k_{18} &= -k_1k_3 - k_7 + i_1k_{15}, \quad k_{19} = -\gamma Z_0k_5 - k_6 - k_3k_{12}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Корни уравнения (7) находятся методом Лагерра или методом Лобачевского [6, 7].

При известных корнях этого уравнения $d_{1_i}, i = 1, \dots, 5$, можно найти $F_{1_i}, F_{2_i}, F_{3_i}$ и $d_{2_i}, i = 1, \dots, 5$, по формулам

$$\begin{aligned}
d_{1_i} &= P(e, d_{1_i}), & F_{1_i} &= \frac{P(a, d_{1_i})}{P(b_1, d_{1_i})}, \\
F_{2_i} &= \frac{P(c, d_{1_i})}{P(b_1, d_{1_i})}, & F_{3_i} &= \frac{P(d, d_{1_i})}{P(b_1, d_{1_i})}, \\
f_{1_i} &= \pm\sqrt{F_{1_i}}, & f_{2_i} &= \pm\sqrt{F_{2_i}}, & f_{3_i} &= \pm\sqrt{F_{3_i}}, & i &= 1, \dots, 5,
\end{aligned} \tag{14}$$

где выражения вида $P(v, x)$ — значения многочлена, заданного вектором v своих коэффициентов в точке x .

Поскольку для каждого набора i_1, i_3 может существовать два коэффициента $i_{2,2}$, удовлетворяющих исходной системе, причем каждому из них может соответствовать не более пяти межфокусных расстояний $d_{1_i}, i = 1, \dots, 5$, для каждого из которых существует восемь комбинаций f_{1_i}, f_{2_i} и $f_{3_i}, i = 1, 2, \dots, 8$, то для каждого набора исходных данных может существовать не более 80 решений (схем оптических систем, удовлетворяющих исходным данным). Однако поскольку рассматриваются только линзовые системы, то число возможных решений сокращается, так как величины f_{1_i}, f_{2_i} и $f_{3_i}, i = 1, 2, \dots, 8$, должны быть действительными не равными нулю числами.

Таким образом, с использованием формул (9)–(14) можно синтезировать до 80 возможных оптических систем для решения рассматриваемой задачи и определить все необходимые параметры этих систем.

После определения параметров конкретного варианта оптической системы можно рассмотреть возможность полной компенсации смещения плоскости изображения для всего диапазона осевого перемещения компонентов (механической компенсации). Для этого необходимо перемещать один или несколько компонентов системы по нелинейному закону. Целесообразно использовать для этого второй компонент, так как его перемещение не влияет на общую длину рассчитанной ранее системы.

Из формул (4), (5) получаем алгебраическое уравнение второй степени, определяющее закон перемещения второго компонента при известных $Z_0, Z'_0, i_1, i_3, f_1, f_2, f_3, d_1$ и d_2 :

$$P_2(s_{2_i}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \tag{15}$$

где

$$\begin{aligned}
p_{2_i} &= a_i b_i, & p_{1_i} &= f_3^2 a_i + b_i (f_1^2 + a_i (c_i - d_i)), \\
p_{0_i} &= f_3^2 (a_i c_i + f_1^2) - b_i (f_1^2 d_i - a_i (f_2^2 - c_i d_i)), \\
a_i &= Z_0 - i_1 m_i, & b_i &= Z'_0 - i_3 m_i, \\
c_i &= d_1 - i_1 m_i, & d_i &= d_2 + i_3 m_i, & i &= 1, 2, \dots, N.
\end{aligned}$$

Очевидно, что компенсировать смещение плоскости изображения можно лишь в тех системах, для которых $p_{1_i}^2 - 4p_{0_i}^2 p_{2_i}^2 \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, N$. В этом случае получаем две возможные траектории перемещения второго компонента. Выбор верной траектории легко осуществить, проверив выполнение условия $\Delta = 0$ при $m = 0$.

Отметим, что можно достичь неподвижности плоскости изображения, не применяя механической компенсации. Поскольку в рассчитанной системе плоскость предмета неподвижна, а плоскость изображения перемещается, то в реверсированной (обращенной) системе с теми же параметрами плоскость предмета (плоскость изображения для исходной системы) будет перемещаться, а оптически сопряженная плоскость на выходе из системы (плоскость предмета для исходной системы) будет неподвижна.

Таким образом, для синтеза системы, используемой для решения рассматриваемой задачи, предлагается следующая последовательность расчета:

1) задаем параметры $i_1, i_3, Z_0, Z'_0, M, m'_1, m'_2$ и точки x_1, x_2, x_3 и x_4 , в которых необходимо компенсировать смещение плоскости изображения;

2) по формулам (8) рассчитываем коэффициенты D_i ;

3) по формуле (9) определяем величину i_2 ;

4) находим коэффициенты уравнения (10);

5) находим действительные не равные нулю корни уравнения (10);

6) из уравнений (14) определяем величины f_1, f_2, f_3, d_1 и d_2 ;

7) производим отбор решений (правила отбора сформулированы далее);

8) при необходимости реверсируем систему и проверяем возможность осуществления механической компенсации смещения плоскости изображения для выбранных вариантов оптической системы согласно формуле (15).

Замечания по отбору решений

1. Поскольку рассматриваются практически осуществимые системы, необходимо, чтобы во всем диапазоне осевого перемещения компонентов отдельные компоненты не касались друг друга. На этапе синтеза известно лишь положение совмещенных главных плоскостей компонентов системы и невозможно определить характерные геометрические размеры отдельных компонентов (радиусы поверхностей, стрелки прогиба, толщины по краю и по оси), поэтому необходимо, чтобы при любом $m \in [m'_1, m'_2]$ выполнялись условия

$$a_{1_k} = f_{1_i} + f_{2_i} + d_1 + \alpha_{1,2} m_k \geq a_{\min}, \quad a_{2_k} = f_{2_i} + f_{3_i} + d_{2,1,2} + \gamma_{1,2} m_k \geq a_{\min},$$

где a_{1_k} и a_{2_k} — соответственно расстояние между первым и вторым компонентами и расстояние между вторым и третьим компонентами для k -го положения компонентов системы; a_{\min} — некоторое назначаемое разработчиком минимально допустимое расстояние между главными плоскостями компонентов системы.

2. Известно, что дифракция на конечной апертуре компонентов оптической системы приводит к увеличению диаметра проходящего гауссова пучка и, как следствие, к уменьшению плотности мощности лазерного излучения, что недопустимо во многих случаях, в частности для лазерной технологии. Следовательно, при отборе систем необходимо учитывать соотношение между диаметром лазерного пучка на компоненте и световым диаметром компонента (его апертурой).

При отборе решений необходимо одновременное выполнение двух условий:

$$\frac{D_{\text{свет}k}}{D_{\text{max}k}} \geq k_{\min}, \quad \frac{D_{\text{свет}k}}{|f_k|} \geq K_{\min},$$

где $D_{\text{свет}k}$ и f_k — соответственно световой диаметр и фокусное расстояние k -го компонента; k_{\min} — назначаемое разработчиком минимальное значение отношения светового диаметра $D_{\text{свет}k}$ к диаметру $D_{\text{max}k}$ лазерного пучка на k -м компоненте; K_{\min} — минимальная величина относительного отверстия k -го компонента.

Объединяя эти два условия, получаем

$$\frac{D_{\text{свет}k}}{f_k} \geq k_{\min} K_{\min}.$$

Таким образом, для любого k -го компонента выбранного варианта системы рассчитывается величина $D_{\text{свет}k} = \max \{D_{ik}\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, и проверяется выполнение этого условия. Можно показать [8], что величины k_{\min} и K_{\min} можно принять равными 2.

3. Поскольку лазерное излучение характеризуется высокой плотностью мощности в проходящем пучке, необходимо избегать установки оптических компонентов в местах фокусировки пучка. Применительно к лазерным системам переменного увеличения это означает, что для всего диапазона осевого перемещения компонентов необходимо избегать попадания компонентов в промежуточные сечения перетяжки проходящего пучка. Фокусные расстояния компонентов, по возможности, должны быть такими, чтобы сечения перетяжки располагались вне оптической системы.

Для трехкомпонентной линзовой системы возможно восемь вариантов оптических схем, различающихся фокусными расстояниями компонентов (рис. 3).

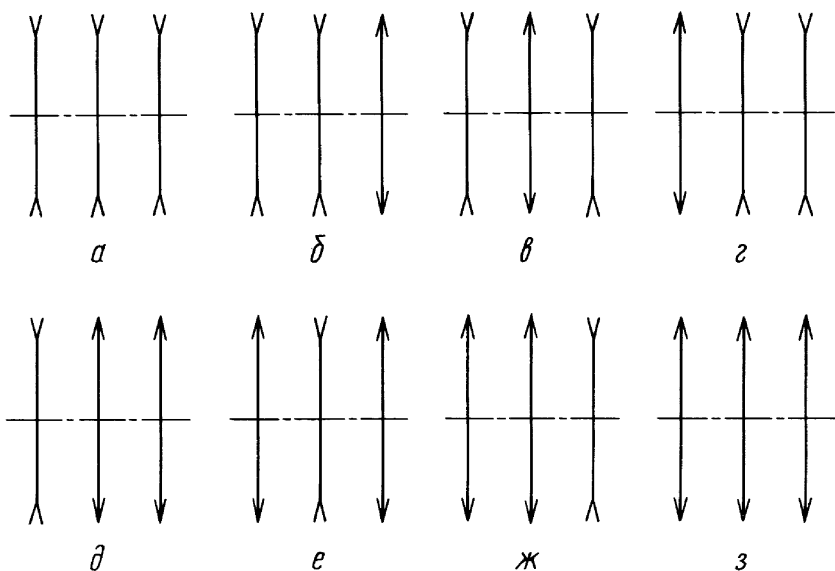


Рис. 3. Возможные варианты оптических схем для трехкомпонентной линзовой системы

Условию отсутствия промежуточной фокусировки наиболее полно соответствуют первые три варианта (рис. 3, а–в). Наличие или отсутствие фокусировки пучка для остальных вариантов зависит от оптической силы компонентов.

Расчет панкратического фокусирующего объектива. В лазерном панкратическом объективе (рис. 4) панкратическая система формирует в плоскости промежуточного изображения P'' лазерный пучок переменного радиуса, который фокусируется последним компонентом системы в плоскости изображения P' . Плоскость P'' является плоскостью предмета для последнего компонента, имеющего постоянное линейное увеличение. При перемещении компонентов панкратической системы изменяется общее линейное увеличение системы, а следовательно, и радиус лазерного пучка в плоскости изображения (плоскости обработки), неподвижность которой необходимо обеспечить.

Вначале рассчитаем панкратическую систему, обеспечивающую заданный перепад увеличений M , а затем реверсируем ее, достигая того, чтобы плоскость промежуточного изображения P'' оставалась неподвижной, при этом плоскость предмета (оптически сопряженное сечение P входящего пучка) перемещалась на величину ΔL относительно своего начального положения P_0 . При задании параметров системы необходимо учитывать, что если линейное увеличение системы равно β , то удельная плотность мощности излучения в плоскости изображения будет в β^2 раз меньше, чем в плоскости предмета.

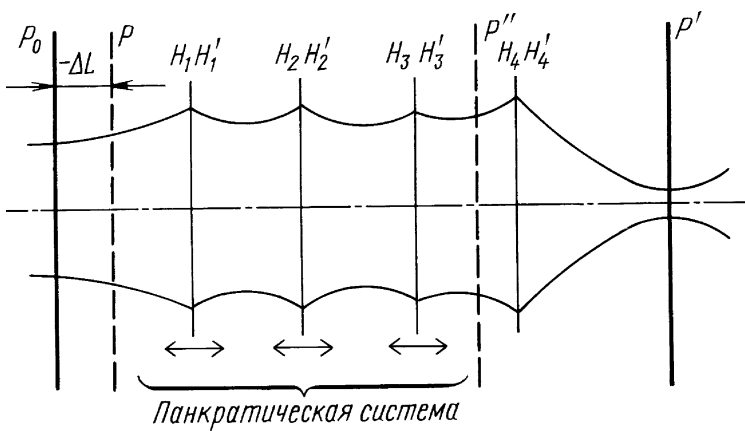


Рис. 4. Схема панкратического фокусирующего объектива:

P — плоскость предмета; P_0 — плоскость предмета в начальном положении; P' — плоскость изображения; P'' — плоскость промежуточного изображения; H_i и H'_i , $i = 1, 2, 3, 4$, — передняя и задняя главные плоскости соответственно; ΔL — величина смещения

Следовательно, для фокусировки излучения необходимо обеспечить $\beta \leq 1$ для всего диапазона перепада увеличений.

Рассчитаем панкратическую систему при $i_1 = -1$, $i_3 = -1,7333$, $Z_0 = -75$ мм, $Z'_0 = 88,9497$ мм, обеспечивающую при осевом перемещении компонентов в интервале $-50 \dots 50$ мм перепад увеличений $M = 100$. При этом смещение плоскости изображения от начального положения компенсируем для $x_1 = x_2 = 0$, $x_3 = -50$ мм и $x_4 = 50$ мм (производим трехточечную компенсацию в центре и на краях интервала, см. рис. 2).

Для проведения расчета согласно предложенному алгоритму была разработана программа, реализованная в среде MathCAD и Microsoft Visual C++. Рассчитанную систему реверсируем и в результате получаем систему, обеспечивающую изменение линейного увеличения в диапазоне $\beta = -3,2441^x \dots -0,0324^x$, для которой плоскость предмета смещается по закону, показанному на рис. 5. Дополняя систему последним компонентом с линейным увеличением $\beta = 0,3083^x$, получаем панкратический объектив с изменением линейного увеличения в диапазоне $\beta = -1^x \dots -0,01^x$.

Параметры панкратического фокусирующего объектива следующие. Диапазон перемещения компонентов панкратической системы $-50 \dots 50$ мм. Вид компенсации смещения плоскости предмета — оптическая трехточечная компенсация для $x_1 = x_2 = 0$, $x_3 = -50$, $x_4 = 50$. Передаточные коэффициенты перемещения для каждого компонента: $i_1 = 1,7333$, $i_2 = 2,2101$, $i_3 = 1$. Задние фокусные расстояния

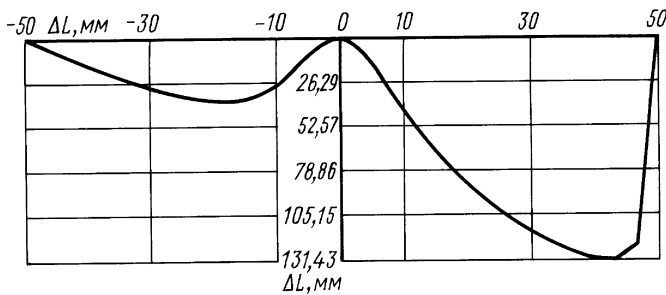


Рис. 5. График зависимости величины ΔL смещения плоскости предмета от величины m смещения компонентов

компонентов: $f_1 = -4,1509$ мм, $f_2 = 110,5262$ мм, $f_3 = 103,9269$ мм, $f_4 = 55,2231$ мм. Расстояния d_i между задним фокусом i -го и передним фокусом $(i + 1)$ -го компонента в начальном положении: $d_1 = -43,1114$ мм, $d_2 = -138,0820$ мм, $d_3 = -104,1500$ мм. Световые диаметры и диафрагменные числа компонентов (при расчете для лазерного пучка с длиной волны лазера $\lambda = 1,0641$ мкм, имеющего параметр конфокальности $Z_k = 200$ мм, сечение перетяжки которого расположено на расстоянии $15,2010$ мм относительно первого компонента в начальном положении): $D_1 = 0,584$ мм, $D_2 = 12,23$ мм, $D_3 = 17,653$ мм, $D_4 = 12,113$ мм, $K_1 = 7,106$, $K_2 = 9,031$, $K_3 = 5,887$, $K_4 = 4,559$. Линейное увеличение в начальном положении: $\beta_0 = -0,0265^x$. Расстояние от совмещенных главных плоскостей первого компонента до плоскости предмета в начальном положении $171,4649$ мм. Максимальное смещение плоскости предмета $-131,4327$ мм. Расстояние от совмещенных главных плоскостей последнего компонента до плоскости изображения $38,2005$ мм. Диапазон изменения линейного увеличения: $\beta_{\min} = -0,01^x$, $\beta_{\max} = -1^x$ при $M = 100$. Длина панкратической системы: минимальная — $102,968$ мм, максимальная — $176,302$ мм, при $m = 0$ — $139,635$ мм; полная длина системы: минимальная — $107,968$ мм, максимальная — $281,302$ мм, при $m = 0$ — $194,635$ мм.

На рис. 6 представлен график зависимости радиуса выходящего пучка от величины смещения компонентов при условии, что на вход

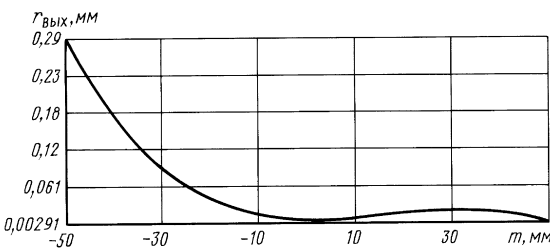


Рис. 6. График зависимости радиуса $r_{\text{вых}}$ выходящего пучка в плоскости изображения P' от величины m смещения компонентов

системы поступает лазерный пучок с параметрами $\lambda = 1,0641$ мкм, $Z_k = 200$ мм, сечение перетяжки которого расположено на расстоянии 15,201 мм относительно первого компонента в начальном положении. На рис. 7 показан ход лазерного пучка в панкратическом фокусирующем объективе.

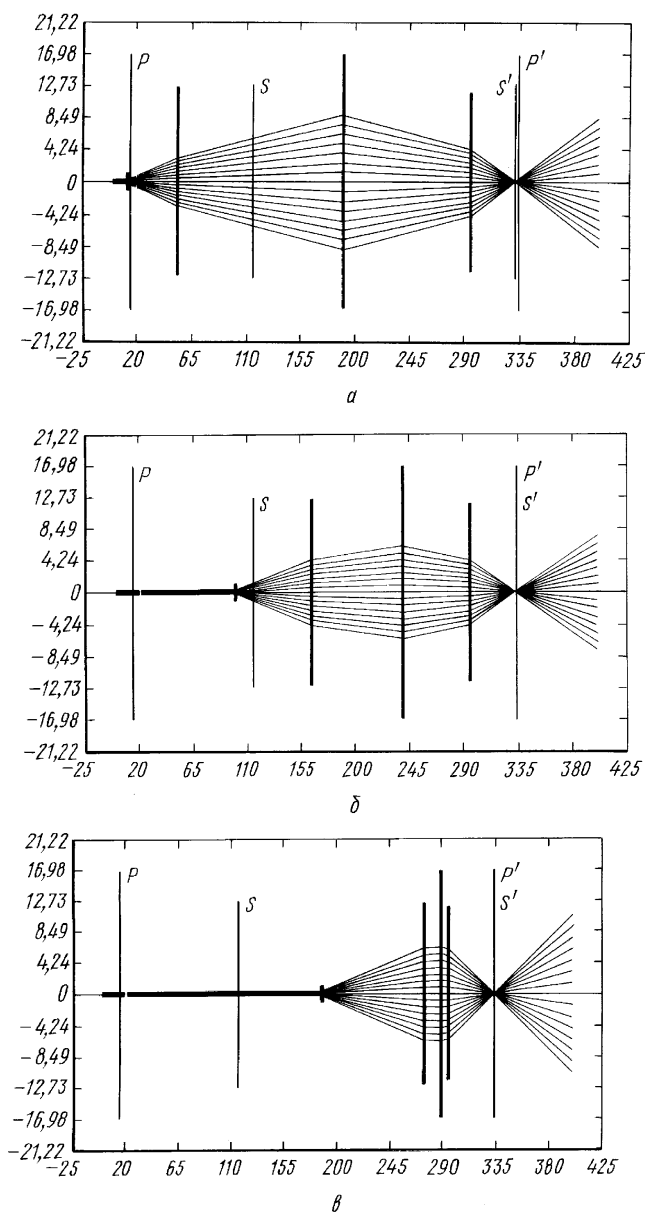


Рис. 7. Ход лазерного пучка в панкратическом фокусирующем объективе:
a — $m = -50$ мм; *б* — $m = 0$ мм; *в* — $m = 50$ мм (*P* — плоскость предмета; *P'* — плоскость изображения; *S* и *S'* — сечения перетяжки лазерного пучка на входе и на выходе системы соответственно)

Заключение. Полученные формулы (9)–(15) позволяют рассчитать основные параметры оптических компонентов лазерных систем переменного увеличения (фокусные расстояния, расстояния между компонентами, продольные габаритные размеры системы и световые диаметры компонентов). Большое число возможных вариантов оптических схем (до 80 решений для одного набора исходных данных) с различными параметрами, являющееся особенностью предложенной методики, позволяет рассчитать и выбрать оптическую схему лазерной системы переменного увеличения для большого числа вариантов наборов исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С в а н и д з е Э. Н., Х а р л а м п о в и ч О. Я. Технологические лазеры. Экономичность и границы эффективности. – М.: Машиностроение, 1990.
2. П а х о м о в И. И. Панкратические системы. – М.: Машиностроение, 1976.
3. П а х о м о в И. И. Трехкомпонентные оптические системы с механической компенсацией // Опτικο-механические приборы. – 1982. – № 6. – С. 41–48.
4. К о р н Г., К о р н Т. Справочник по высшей математике / Под ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1974.
5. С п р а в о ч н и к по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и Н. Стиган. – М.: Наука, 1979.
6. В е р ж б и ц к и й В. М. Численные методы. – М.: Высшая школа, 2001.
7. К а х а н е р Д., М о у л е р М., Н э ш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 2001.
8. П а х о м о в И. И., Ц и б у л я А. Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986.

Статья поступила в редакцию 24.10.2003



Иван Иванович Пахомов родился в 1930 г., окончил в 1954 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, заслуженный профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 130 научных работ в области оптики, физики лазеров, расчета оптических систем лазерных приборов, оптических систем переменного увеличения.

I.I. Pakhomov (b. 1930) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), honoured professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 130 publications in the field of optics, laser physics, design of optical systems for laser devices, optical systems with zoom.