

МЕТОДИКА ГАБАРИТНОГО СИНТЕЗА ЛАЗЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЫХОДНОЙ ПЕРЕТЯЖКИ ПОСТОЯННОГО РАЗМЕРА

А.О. Погоньшев

pogonyshv@vniiofi.ru

SPIN-код: 3436-4130

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена методика габаритного синтеза лазерных оптических систем для перемещения выходной лазерной перетяжки постоянного размера по поверхности обрабатываемого материала. Произведен выбор структурной схемы лазерной оптической системы в виде двухкомпонентной системы. Разработана методика и на ее основе алгоритм габаритного синтеза для перемещения выходной лазерной перетяжки постоянного размера. Задача перемещения лазерной перетяжки постоянного размера имеет множество решений. Для нахождения наилучшего использована целевая функция, учитывающая специфику решаемой задачи.

Ключевые слова

Лазерная оптика, лазерная оптическая система, габаритный синтез, перемещение лазерной перетяжки, целевая функция

Поступила в редакцию 13.12.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Большинство лазерных оптических систем (ЛОС), используемых в установках для лазерной гравировки [1, 2], лишены возможности точно фокусировать лазерное излучение по всем точкам рабочей поверхности обрабатываемого материала. Предлагается разработать ЛОС, которая обеспечит фокусировку лазерного излучения в пятно постоянного размера по всей рабочей поверхности, что способствует повышению качества данной технологической операции.

В настоящей работе речь идет о методике габаритного синтеза ЛОС для перемещения выходной лазерной перетяжки постоянного размера по поверхности обрабатываемого материала. Такие ЛОС могут найти применение в различных технологических операциях по обработке материалов. Благодаря сохранению размера выходной перетяжки при ее перемещении, становится возможным точно фокусировать лазерное излучение в любой точке обрабатываемого материала.

Целью габаритного синтеза является определение структурной схемы и всех габаритных параметров ЛОС: (фокусных расстояний f' , световых диаметров $D_{св}$, диафрагменных чисел N_d , законов перемещения оптических компонентов) [3–5]. В качестве исходных данных выступают параметры входного (z_k, h_p, θ) и выходного (z'_k, h'_p, θ') лазерных пучков, габаритные ограничения ЛОС ($L_{доп}$ — предельно допустимое расстояние между входной и выходной пере-

тяжками, $d_{\text{доп}}$ — минимально допустимое расстояние между оптическими компонентами, $N_{d\text{min}}$ — минимально допустимое диафрагменное число оптических компонентов, $D_{\text{доп}}$ — максимально допустимый световой диаметр оптических компонентов), расстояние перемещения выходной относительно входной перетяжки ΔL [3–6].

При габаритном синтезе ЛОС необходимо определить ее структурную схему, а именно количество оптических компонентов, входящих в эту систему. Для реализации задачи перемещения лазерной перетяжки постоянного размера предлагается рассмотреть однокомпонентную ЛОС (рис. 1).

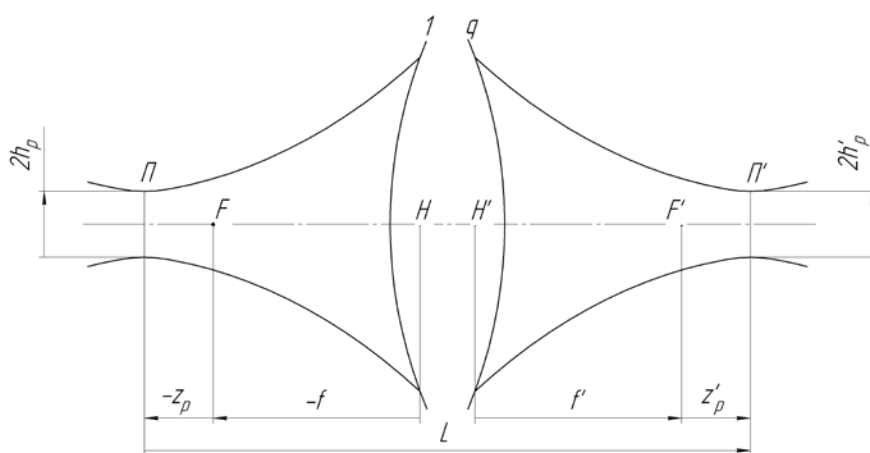


Рис. 1. Однокомпонентная ЛОС:

Π, Π' — плоскости входной и выходной перетяжек; F, F' — передний и задний фокусы ЛОС; H, H' — передняя и задняя главные точки ЛОС; f, f' — переднее и заднее фокусные расстояния ЛОС; z_p, z'_p — смещение входной и выходной перетяжек относительно переднего и заднего фокусов; h_p, h'_p — полурадиус перетяжки входного и выходного лазерных пучков; L — расстояние между входной и выходной перетяжками

Требуемое продольное увеличение ЛОС определяется с помощью соотношений [3, 4]:

$$\alpha_{\text{тр}} = \frac{z'_k}{z_k} = -\frac{z'_p}{z_p} = \left(\frac{\theta}{\theta'} \right)^2 = \left(\frac{h'_p}{h_p} \right)^2 = \frac{f'^2}{z_k^2 + z_p^2}, \quad (1)$$

где z_k, z'_k — конфокальные параметры входного и выходного лазерных пучков; θ, θ' — расходимость входного и выходного лазерных пучков.

Значение z_p для однокомпонентной системы может быть вычислено с помощью соотношения:

$$z_p^2 = \frac{f'^2 - \alpha_{\text{тр}} z_k^2}{\alpha_{\text{тр}}}. \quad (2)$$

Значение z'_p для однокомпонентной системы с помощью соотношения:

$$z_p'^2 = (f'^2 - \alpha_{\text{тр}} z_k^2) \alpha_{\text{тр}}. \quad (3)$$

Исходя из условия поставленной задачи, величины f' , z_k , $\alpha_{\text{тр}}$ являются постоянными. Следовательно, задача перемещения выходной перетяжки при сохранении ее размера и применении однокомпонентной системы не реализуема.

Далее предлагается к рассмотрению двухкомпонентная ЛОС (рис. 2).

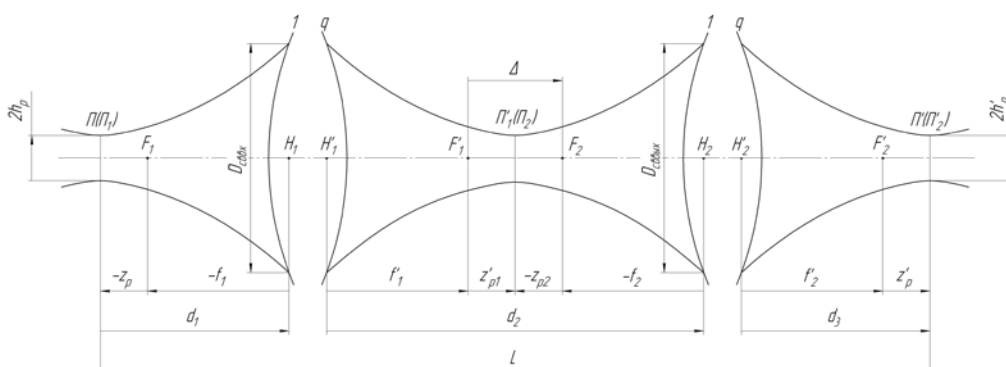


Рис. 2. Двухкомпонентная ЛОС:

Δ — расстояние между задним фокусом первого оптического компонента и передним фокусом второго; d_1 — расстояние от входной перетяжки Π до первого оптического компонента; d_2 — расстояние между оптическими компонентами; d_3 — расстояние от второго оптического компонента до выходной перетяжки Π' ; $D_{\text{св.вх}}$, $D_{\text{св.вых}}$ — световой диаметр первого и второго оптических компонентов соответственно

Из соотношения (1) и рис. 2 следует, что для двухкомпонентной системы [3]

$$\begin{aligned} z_p' &= -\alpha_2 z_{p2}; \\ -z_{p2} &= \Delta - z_{p1}'; \\ z_{p1}' &= -\alpha_1 z_p; \\ \alpha_1 \alpha_2 &= \alpha_{\text{тр}}; \\ z_p &= \sqrt{\frac{f_1'^2 - \alpha_1 z_k^2}{\alpha_1}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где α_1 , α_2 — продольные увеличения первого и второго оптического компонентов соответственно. Из уравнений (4) следует, что

$$z_p' = \left(\Delta \frac{z_k^2 + z_p^2}{f_1'^2} + z_p \right) \alpha_{\text{тр}}. \quad (5)$$

Исходя из условия, величины f' , z_k , $\alpha_{\text{тр}}$ являются постоянными, величины Δ , z_p — переменными. Следовательно, задача перемещения выходной перетяжки при сохранении ее размера в двухкомпонентной ЛОС теоретически выполнима. Таким образом, определение двух оптических компонентов является минимальным для решения поставленной задачи, поэтому алгоритм габаритного синтеза разрабатывался именно для таких систем.

Далее требуется определить фокусные расстояния f'_1 и f'_2 , световые диаметры $D_{\text{св.вх}}$ и $D_{\text{св.вых}}$, диафрагменные числа N_{d1} и N_{d2} , законы перемещения и диапазоны изменения расстояний d_1 , d_2 , d_3 оптических компонентов ЛОС (см. рис. 2). Получим основные соотношения для определения этих параметров [3, 5, 7, 8].

Согласно (1), требуемое продольное увеличение

$$\alpha_{\text{тр}} = \left(\frac{h'_p}{h_p} \right)^2. \quad (6)$$

Применяя формулы (1), (4), (5), получим соотношение для продольного увеличения всей системы [6]:

$$\alpha_{\text{тр}} = \frac{f_2'^2 / f_1'^2}{1 + 2\Delta z_p / f_1'^2 + \Delta^2 (z_k^2 + z_p^2) / f_1'^4}. \quad (7)$$

Знаменатель выражения (7) должен быть постоянной величиной так же, как и размер перетяжки на выходе. Обозначим данную величину как P . Тогда фокусное расстояние второго оптического компонента при заданном фокусном расстоянии первого компонента определяется из соотношения

$$f_2' = \sqrt{P\alpha_{\text{тр}}} f_1'. \quad (8)$$

Из равенства (8) видно, что фокусные расстояния оптических компонентов имеют одинаковый знак, так как выражение $\sqrt{P\alpha_{\text{тр}}}$ всегда положительно.

Из выражения (7) следуют зависимости $\Delta(z_p)$:

$$\Delta(z_p) = \frac{f_1'^2}{z_p^2 + z_k^2} \left(-z_p \pm \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + z_p^2)} \right), \quad (9)$$

причем должно выполняться следующее условие:

$$P \geq \frac{z_k^2}{z_k^2 + z_p^2}. \quad (10)$$

Таким образом, получены две зависимости $\Delta(z_p)$, которые могут обеспечить решение поставленной задачи. Дальнейшие соотношения будут получены с использованием следующей зависимости:

$$\Delta(z_p) = \frac{f_1'^2}{z_p^2 + z_k^2} \left(-z_p + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + z_p^2)} \right), \quad (11)$$

а для второго соотношения

$$\Delta_1(z_p) = \frac{f_1'^2}{z_p^2 + z_k^2} \left(-z_p - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + z_p^2)} \right), \quad (12)$$

все другие соответствующие зависимости будут получены по аналогии.

Подставим (11) в (5) и запишем

$$z_p' = \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + z_p^2)} \alpha_{\text{тр}}, \quad (13)$$

а также

$$z_p = \sqrt{\frac{z_p'^2}{\alpha_{\text{тр}}^2 P} - \frac{P-1}{P} z_k^2}. \quad (14)$$

Из соотношений (13) и $d_3 = z_p' + f_2'$ может быть получена зависимость

$$d_3(d_1) = \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_2'. \quad (15)$$

Из выражений (11) и $d_1 = -f_1 - z_p$ — другая зависимость:

$$d_2(d_1) = \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f_1' + f_2'. \quad (16)$$

Таким образом, с учетом (15) и (16) запишем

$$\begin{aligned} L(d_1) &= d_1 + d_2(d_1) + d_3(d_1) = \\ &= d_1 + \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + \\ &+ \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_1' + 2f_2', \end{aligned} \quad (17)$$

где L — расстояние между входной и выходной перетяжками (рис. 2).

Зависимости $d_2(d_1)$, $d_3(d_1)$, $L(d_1)$ для соотношения (12) с учетом соотношений (15)–(17) имеют вид

$$d_{21}(d_1) = \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f_1' + f_2'; \quad (18)$$

$$d_{31}(d_1) = -\alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_2'; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} L_1(d_1) &= d_1 + d_2(d_1) + d_3(d_1) = \\ &= d_1 + \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) - \\ &- \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_1' + 2f_2'. \end{aligned} \quad (20)$$

Таким образом, для любой комбинации фокусных расстояний оптических компонентов ЛОС существует два решения, обеспечивающих выполнение поставленной задачи. Однако при этом значения расстояния между входной и выходной перетяжками L различны. Очевидно, если полученные зависимости (11) и (12) будут иметь близкие значения при одинаковых z_p , то может возникнуть резкое изменение значения L согласно одной из зависимостей $\Delta(z_p)$, то есть переход от одной зависимости $L(d_1)$, соответствующей определенной $\Delta(z_p)$, к другой. Поэтому данное суждение справедливо и для зависимости $d_2(d_1)$. Вследствие чего нарушится монотонность функции $L(d_1)$, что недопустимо в рамках решаемой задачи. Поэтому при проведении габаритного синтеза необходимо убедиться, что этого не происходит.

При выборе параметра P существует несколько ограничений. Прежде всего, параметр P должен удовлетворять неравенству (10), которое задает область допустимых значений для данного параметра. Однако задавать большие значения параметра P не рекомендуется, поскольку согласно соотношению (8) получится большое фокусное расстояние второго оптического компонента, а соответственно большая длина системы в целом (17), (20) и большой световой диаметр второго оптического компонента (23). Согласно соотношениям (11) и (12), функции $\Delta(z_p)$ и $\Delta_1(z_p)$ будут принимать приблизительно одинаковые значения при $P \ll 1$, так как подкоренное выражение будет стремиться к нулю, что является недопустимым. В связи с вышесказанным, рекомендуется принимать значение параметра P близкое к единице.

Световой диаметр первого оптического компонента вычисляется с помощью соотношения [3, 7–9]:

$$D_{\text{св.вх}} = 2h_p \sqrt{1 + \frac{d_{1\text{max}}^2}{z_k^2} K_d \sqrt{M^2}}, \quad (21)$$

где K_d — коэффициент запаса светового диаметра; $d_{1\text{max}}$ — предельное расстояние от входной перетяжки до первого оптического компонента (рис. 2). При

расчете параметр d_1 берется максимальным для получения максимального значения светового диаметра.

Диафрагменное число первого оптического компонента вычисляется с помощью соотношения [3, 7–9]:

$$N_{d_1} = \frac{f'_1}{D_{\text{св.вх}}}. \quad (22)$$

Световой диаметр второго оптического компонента находим с помощью выражения:

$$D_{\text{св.вых}} = 2h'_p \sqrt{1 + \frac{d_{3\text{max}}^2}{z_k'^2} K_d \sqrt{M^2}}, \quad (23)$$

где $d_{3\text{max}}$ — предельное расстояние от второго оптического компонента до выходной перетяжки (см. рис. 2). Параметр d_3 берем максимальным для получения максимального светового диаметра.

Диафрагменное число второго оптического компонента вычисляем с помощью соотношения:

$$N_{d_2} = \frac{f'_2}{D_{\text{св.вых}}}. \quad (24)$$

Таким образом, для перемещения лазерной перетяжки постоянного размера нужно менять параметры d_1 и d_2 одновременно, в соответствии с зависимостью (16) или (18). Причем положение выходной перетяжки относительно входной будет меняться в соответствии с зависимостью (17) или (20) [6].

Поставленная задача имеет множество решений. То есть путем перебора комбинаций конструктивных параметров ЛОС можно обеспечить ее решение. Для определения наилучшего решения, которое будет использоваться в разрабатываемой ЛОС, применим целевую функцию, позволяющую учесть специфику поставленной задачи:

$$F = \frac{p_1}{N_{d\text{min}} M_1} + \frac{p_2 L_{\text{max}}}{M_2} + \frac{p_3 D_{\text{св.мах}}}{M_3}, \quad (25)$$

где p_1, p_2, p_3 — веса слагаемых целевой функции; M_1, M_2, M_3 — размерные масштабы целевой функции; $N_{d\text{min}}$ — минимальное значение диафрагменного числа компонентов во всем диапазоне ΔL ; L_{max} — максимальное расстояние между перетяжками; $D_{\text{св.мах}}$ — максимальный световой диаметр, достигаемый в системе.

Веса слагаемых и размерные масштабы целевой функции выбирают экспертным путем с учетом специфики решаемой задачи. Для разрабатываемой ЛОС предпочтительно то решение, которое имеет меньшее значение целевой функции F [10].

На основании представленного выше математического аппарата для решения обозначенной задачи разработан алгоритм габаритного синтеза двухкомпонентной ЛОС. Для его выполнения необходимо совершить следующие действия.

1. Задать параметры входного и выходного лазерных пучков, габаритные ограничения ЛОС, расстояние перемещения выходной относительно входной перетяжки ΔL . Далее вычисляем требуемое продольное увеличение всей оптической системы $\alpha_{\text{тр}}$ с помощью соотношения (6):

$$\alpha_{\text{тр}} = \left(\frac{h'_p}{h_p} \right)^2.$$

2. Задать значения фокусного расстояния первого оптического компонента f'_1 и параметра P , которые представляют собой последовательности значений с фиксированным шагом и находятся в заданных диапазонах $[f'_{1\min}, f'_{1\max}]$ и $[P_{\min}, P_{\max}]$.

2.1. Организовать цикл для перебора значений f'_1 с заданным шагом.

2.2. Создать цикл для перебора значений параметра P с заданным шагом. В данном случае он находится внутри цикла, указанного в 2.1. В приведенном алгоритме для каждой комбинации перебираемых значений f'_1 и P находят все габаритные параметры ЛОС и проверяют выполнение всех заданных ограничений. Лишь в этом случае комбинация конструктивных параметров ЛОС является решением. Затем это решение исследуют и сравнивают с другими по значению целевой функции. Согласно пунктам 3–7 алгоритма, выполняют расчет всех габаритных параметров и проверяют выполнение всех ограничений.

3. Определить фокусное расстояние второго оптического компонента с помощью соотношения (8):

$$f'_2 = \sqrt{P\alpha_{\text{тр}}} f'_1,$$

затем задать функции $d_3(d_1)$, $d_2(d_1)$, $L(d_1)$ согласно выражениям (15)–(17):

$$\begin{aligned} d_3(d_1) &= \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f'_2; \\ d_2(d_1) &= \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f'_1 + f'_2; \\ L(d_1) &= d_1 + d_2(d_1) + d_3(d_1) = \\ &= d_1 + \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + \\ &+ \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f'_1 + 2f'_2. \end{aligned}$$

Здесь реализован поиск интервала монотонности функции $L(d_1)$ для обеспечения заданного значения ΔL , как это показано на рис. 3. Синей линией обозначен искомый интервал монотонности. При этом значения функции $L(d_1)$ в заданном интервале должны быть положительны и минимальны для того, чтобы обеспечить наименьшую длину системы.

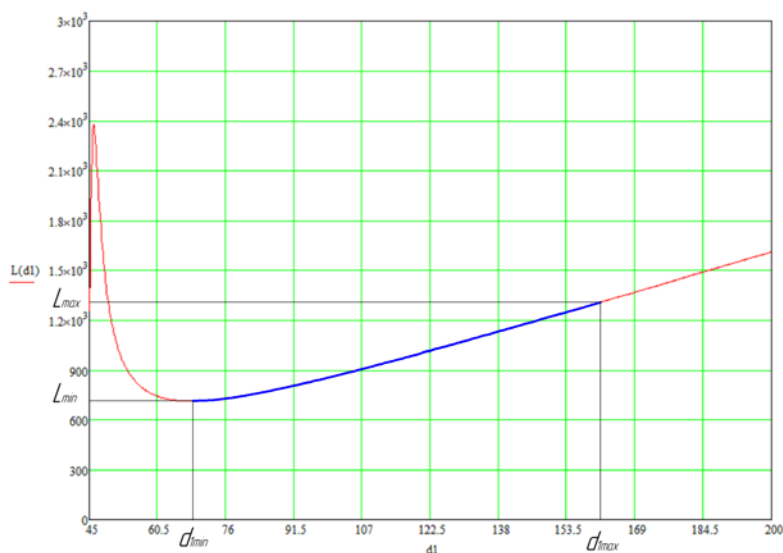


Рис. 3. Интервал монотонности на графике функции $L(d_1)$

3.1. Для определения интервала монотонности функции $L(d_1)$ найти минимальное расстояние d_{1min} с помощью точки экстремума, ближайшей к фокусному расстоянию первого оптического компонента. После чего вычислить значение $L(d_{1min}) = L_{min}$, согласно выражению (17):

$$\begin{aligned}
 L(d_1) &= d_1 + d_2(d_1) + d_3(d_1) = \\
 &= d_1 + \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + \\
 &+ \alpha_{тр} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_1' + 2f_2'.
 \end{aligned}$$

3.2. Найти значение L_{min} с помощью из выражения

$$L_{max} = L_{min} \pm \Delta L. \quad (26)$$

Знак в формуле (26) определяется характером монотонности выбранного участка функции, то есть знак «плюс» выбирается для возрастающей функции, «минус» — для убывающей. С целью определения характера монотонности функции вычисляем значение производной функции на выбранном участке.

При положительном значении производной функция возрастает, при отрицательном — убывает.

Из зависимости $L(d_1)$ находим значение $d_{1\max}$ и соответствующее L_{\max} , то есть $L(d_{1\max}) = L_{\max}$.

3.3. Проверить выполнение условия $\left| \frac{dL}{d(d_1)} \right| \leq L'_{\text{доп}}$, где $L'_{\text{доп}}$ — предельно

допустимое значение производной на выбранном интервале монотонности. Данное условие ограничивает крутизну функции $L(d_1)$. Если оно не выполняется, то ищут другое $d_{1\min}$, соответствующее точке экстремума функции, и заново проводят шаги 3.1–3.2 алгоритма. Если данное условие не выполняется для области значений функции $L(d_1) [f'_1; \infty]$, то переходят к шагу 2.2 алгоритма.

Проверяем следующее условие: $L_{\max} \leq L_{\text{доп}}$, где $L_{\text{доп}}$ — предельно допустимое расстояние между входной и выходной перетяжками. Если данное условие не выполняется, то производится переход к шагу 2.2 алгоритма.

4. Вычислить диапазоны изменения d_2 и d_3 , согласно выражениям (15)–(16):

$$d_3(d_1) = \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2) + f_2'};$$

$$d_2(d_1) = \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 + \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f_1' + f_2'.$$

Для этого находят значения $d_{2\min}$, $d_{2\max}$, $d_{3\min}$, $d_{3\max}$:

$$d_{2\min} = d_2(d_{1\min});$$

$$d_{2\max} = d_2(d_{1\max});$$

$$d_{3\min} = d_3(d_{1\min});$$

$$d_{3\max} = d_3(d_{1\max}).$$

Далее проверяют условия: $d_{2\min} \geq d_{\text{доп}}$; $d_{2\max} \geq d_{\text{доп}}$; $d_{3\min} \geq d_{\text{доп}}$; $d_{3\max} \geq d_{\text{доп}}$, где $d_{\text{доп}}$ — минимально допустимое значение для полученных величин. Данные условия обеспечивают физическую реализацию разрабатываемой ЛОС. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то переходят к шагу 2.2 алгоритма.

5. Вычислить световой диаметр и диафрагменное число первого оптического компонента с помощью выражений (21) и (22):

$$D_{\text{св.вх}} = 2h_p \sqrt{1 + \frac{d_{1\max}^2}{z_k^2} K_d \sqrt{M^2}};$$

$$N_{d_1} = \frac{f_1'}{D_{\text{св.вх}}}.$$

5.1. Вычислить световой диаметр и диафрагменное число второго оптического компонента с помощью выражений (23) и (24):

$$D_{\text{св.в.ых}} = 2h'_p \sqrt{1 + \frac{d_{3\text{max}}^2}{z_k'^2} K_d \sqrt{M^2}};$$

$$N_{d_2} = \frac{f_2'}{D_{\text{св.в.ых}}}.$$

5.2. Проверить условия $N_{d_1} \geq N_{d_{\text{min}}}$; $N_{d_2} \geq N_{d_{\text{min}}}$, где $N_{d_{\text{min}}}$ — минимально допустимое диафрагменное число оптических компонентов. Данные условия обеспечивают достаточно высокие диафрагменные числа оптических компонентов, это в свою очередь — низкие aberrации оптической системы, а также приемлемые значения световых диаметров оптических компонентов. Если оно не выполняется, то переходят к шагу 2.2 алгоритма.

Также необходимо проверить условия $D_{\text{св.вх}} \leq D_{\text{доп}}$; $D_{\text{св.в.ых}} \leq D_{\text{доп}}$, здесь $D_{\text{доп}}$ — максимально допустимый световой диаметр оптических компонентов. Если данное условие не выполняется, то переходят к шагу 2.2 алгоритма.

6. Задать функцию $d_{21}(d_1)$ согласно выражению (18):

$$d_{21}(d_1) = \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f_1' + f_2'.$$

На всем интервале $[d_{1\text{min}}; d_{1\text{max}}]$ проверяют условие $|d_2(d_1) - d_{21}(d_1)| \leq \delta_{\text{доп}}$, где $\delta_{\text{доп}}$ — предельно допустимая разность между значениями $d_2(d_1)$ и $d_{21}(d_1)$ при одинаковых d_1 . Данное условие обеспечивает невозможность перехода от одной зависимости $L(d_1)$, соответствующей определенной $\Delta(z_p)$, к другой. Если данное условие не выполняется, то переходят к шагу 2.2 алгоритма.

7. Определить является ли решением данная комбинация конструктивных параметров ЛОС на основании выполнения всех заданных граничных условий. Данное решение заносят в массив решений для дальнейшего исследования и сравнения с другими решениями по значению целевой функции.

8. Перейти к шагу 2.2 алгоритма или шагу 2.1.

8.1. Произвести переход на следующий шаг в пункте 2.1 алгоритма.

9. Поскольку для любой комбинации заданных габаритных параметров существует два варианта, обеспечивающих решение поставленной задачи, повторить шаги 2.1–8 алгоритма габаритного синтеза для $d_{21}(d_1)$, $d_{31}(d_1)$, $L_1(d_1)$:

$$d_{21}(d_1) = \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) + f_1' + f_2';$$

$$d_{31}(d_1) = -\alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_2';$$

$$\begin{aligned}
L_1(d_1) &= d_1 + d_2(d_1) + d_3(d_1) = \\
&= d_1 + \frac{f_1'^2}{(d_1 + f_1)^2 + z_k^2} \left(d_1 + f_1 - \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} \right) - \\
&- \alpha_{\text{тр}} \sqrt{-z_k^2 + P(z_k^2 + (d_1 + f_1)^2)} + f_1' + 2f_2'.
\end{aligned}$$

10. Вычислить целевую функцию с помощью соотношения (25):

$$F = \frac{P_1}{N_{d\min} M_1} + \frac{P_2 L_{\max}}{M_2} + \frac{P_3 D_{\text{св. max}}}{M_3}.$$

Для разрабатываемой ЛОС выбирают то решение, которое имеет меньшее значение целевой функции F .

11. Если в выбранном решении один из параметров f_1' или P находится на границе выбранных интервалов, то изменить значения $f_{1\min}'$, $f_{1\max}'$, P_{\min} , P_{\max} таким образом, чтобы полученное решение не лежало на границе интервалов. Далее повторять шаги 2–10 алгоритма габаритного синтеза до тех пор, пока не будет найдено решение, лежащее не на границе заданных интервалов.

Выводы. Разработана методика габаритного синтеза двухкомпонентной ЛОС для перемещения выходной лазерной перетяжки постоянного размера, которая может найти применение в различных технологических операциях обработки материалов. ЛОС представляет собой двухкомпонентную оптическую систему, обеспечивающую требуемые параметры лазерного пучка, а также перемещение выходной перетяжки путем изменения расстояний между входной перетяжкой лазера и ее оптическими компонентами согласно полученным законам перемещения. Поставленная задача имеет несколько решений. Для определения наиболее подходящего из них использовали целевую функцию, которая учитывает специфику решаемой задачи. Таким образом, была получена ЛОС, выполняющая поставленную задачу наиболее оптимальным способом.

Литература

- [1] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 660 с.
- [2] Григорьянц А.Г., Соколов А.А. *Лазерная резка металлов*. Москва, Высшая школа, 1988, 127 с.
- [3] Пахомов И.И., Цибуля А.Б. *Расчет оптических систем лазерных приборов*. Москва, Радио и связь, 1986, 152 с.
- [4] Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. *Оптико-электронные квантовые приборы*. Москва, Радио и связь, 1982, 456 с.
- [5] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. *Теория оптических систем*. Москва, Машиностроение, 1992, 447 с.
- [6] Ширанков А.Ф., Пахомов И.И., Иванов В.А., Аниканов А.Г., Штыков С.А., Носов П.А., Павлов В.Ю. *Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка*. Патент 2411598 РФ. Заявл. 18.11.2008, опубл. 10.02.2011.

- [7] Носов П.А., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Состояние и перспективы развития методов расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 9.
URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/363.html>.
- [8] Ширанков А.Ф., Носов П.А., Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Якунин В.П., Третьяков Р.С. Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 9.
URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/926.html>.
- [9] Носов П.А., Павлов В.Ю., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Аберрационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков. *Оптический журнал*, 2011, т. 78, № 11, с. 34–44.
- [10] Родионов С.А. *Автоматизация проектирования оптических систем*. Ленинград, Машиностроение, 1982, 270 с.

Погонышев Андрей Олегович — студент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Ширанков Александр Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

METHODS OF LASER OPTICAL SYSTEMS DIMENSIONAL SYNTHESIS FOR MOVING FIXED SIZED OUTPUT BEAM WAIST

A.O. Pogonyshv

pogonyshv@vniiofi.ru
SPIN-code: 3436-4130**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation****Abstract**

The article introduces some methods for the dimensional synthesis of laser optical systems with the purpose of moving the fixed sized output beam waist on the surface of the process material. We have selected a structural flow chart of the laser optical system in the form of a two-component system. We have developed a methodology resulted in the dimensional synthesis algorithm for moving the fixed sized output beam waist. The problem of moving the output beam waist of the fixed size has a variety of solutions. To find the best one, we use an objective function taking into account the specifics of the task solved.

Keywords

Laser optics, laser optical system, dimensional synthesis, moving the beam waist, objective function

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki [Technological processes of laser processing]. Moscow, Bauman Press, 2006, 660 p.
- [2] Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. Lazernaya rezka metallov [Laser metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1988, 127 p.
- [3] Pakhomov I.I., Tsibulya A.B. Raschet opticheskikh sistem lazernykh priborov [Calculation of laser devices optical systems]. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1986, 152 p.
- [4] Pakhomov I.I., Rozhkov O.V., Rozhdestvin V.N. Optiko-elektronnye kvantovye pribory [Optical electronics devices]. Moscow, Radio i svyaz' publ., 1982, 456 p.
- [5] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh sistem [Optical systems theory]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1992, 447 p.
- [6] Shirankov A.F., Pakhomov I.I., Ivanov V.A., Anikanov A.G., Shtykov S.A., Nosov P.A., Pavlov V.Yu. Sposob i ustroystvo dlya peremeshcheniya peretyazhki lazernogo puchka. Patent 2411598 RF. [Method and device for laser beam waist displacement]. Patent 2411598 RF. Appl. 18.11.2008, publ. 10.02.2011.
- [7] Nosov P.A., Pakhomov I.I., Shirankov A.F. Development condition and prospect of the design methods of laser radiation conversion by optical systems. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/363.html>.
- [8] Shirankov A.F., Nosov P.A., Pakhomov I.I., Grigor'yants A.G., Yakunin V.P., Tret'yakov R.S. Elaboration of laser optical systems of technological installations on the base of the laser optics theory. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/926.html>.

- [9] Nosov P.A., Pavlov V.Yu., Pakhomov I.I., Shirankov A.F. Aberrational synthesis of optical systems intended for the conversion of laser beams. *Opticheskiy zhurnal*, 2011, vol. 78, no. 11, pp. 34–44. (Eng. version: *Journal of Optical Technology*, 2011, vol. 78, no. 9, pp. 586–593).
- [10] Rodionov S.A. *Avtomatizatsiya proektirovaniya opticheskikh system* [Automation of optical system engineering]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1982, 270 p.

Pogonyshev A.O. — student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Shirankov A.F., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.