

В.И. Воронов, В.В. Трофимов

Адаптивное управление лучевыми потоками многопучкового лазера

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию 17.07.2000 г.

Представлены результаты моделирования адаптивной системы коррекции наклонов волновых фронтов многопучкового лазера. В качестве исполнительных элементов использовано сегментированное зеркало, каждый сегмент которого работает на свой лучевой поток. Разработана модель системы, определены максимально допустимые размеры диафрагмы в измерительном канале, позволяющие обеспечить требуемое качество коррекции. Представлены результаты численного исследования системы для 16-пучкового лазера.

Введение

Некоторые типы лазеров генерируют трубчатые пучки, образованные несколькими лучевыми потоками. Такие пучки, сохраняющие свою форму на всей трассе, могут быть получены от широкоапертурных лазеров с активным объемом кольцевого сечения – так называемых коаксиальных лазеров [1]. С помощью трубчатых пучков на трассе зондирования можно создать волну «просветления» для зондирующего излучения внутри следа «просветления» [2, 3].

Лучевые потоки, образующие трубчатый пучок, формируются многоходовыми типами колебаний (М-модами) и распространяются внемеридионально на трассе пучка [1]. Особенности пространственной структуры М-мод одного из широкоапертурных лазеров этого типа – лазера «Юпитер» – рассмотрены в [4], а его конструкция и результаты экспериментального исследования представлены в [5].

Достоинством лазера является сфазированность всех лучевых потоков, составляющих трубчатый пучок, поскольку каждый из них образован одной и той же М-модой. При использовании такого лазера в лидарных комплексах отпадает необходимость в предварительном пространственном разделении излучения (для управления каждой отдельной частью пучка с помощью своего корректора).

Для лазеров, работающих на М-модах, характерны меняющиеся во времени наклоны волновых фронтов отдельных потоков, обусловленные случайными и нестационарными неоднородностями активной среды. В лазере «Юпитер» экспериментально измеренный период флуктуаций составляет от 0,1 до 2 с [5]. Очевидно, что использование подобных лазеров для целей зондирования атмосферы требует применения адаптивных систем для стабилизации пространственных характеристик излучения.

В данной статье представлены результаты численного моделирования адаптивной системы коррекции наклонов волновых фронтов многопучкового излучения лазера «Юпитер».

1. Постановка задачи

В качестве одного из вариантов системы адаптации многопучкового лазера можно использовать двухканальную систему, имея в виду, что задачей первого канала является обеспечение начальной параллельности всех пучков на входе в среду, а второго – обеспечение их последующей адаптации к атмосферным искажениям. Конечно, возможен вариант, когда обе задачи решаются в одном канале.

Исходя из методических соображений, на начальном этапе исследований целесообразно рассмотреть работу каждого канала в отдельности. Поэтому основной целью данной работы является анализ особенностей, которые возникают в первом канале – канале коррекции наклонов волновых фронтов отдельных лучевых потоков на выходе лазера.

Число лучевых потоков М-моды, генерирующей в лазере «Юпитер», достаточно просто регулируется с помощью внутррезонаторных диафрагм [5]. Экспериментальные исследования показывают, что для отдельного управления потоками удобен режим, когда лазер генерирует одну 16-лучевую моду. Параллельность всех потоков после лазера (на входе в область зондирования) можно оценить известным методом – по качеству фокусировки части излучения в пределах малой диафрагмы, установленной в измерительном тракте канала адаптации. В связи с недостаточной изученностью режимов адаптации многопучковых лазеров в статье рассматриваются следующие вопросы:

1. Свойства функционала фокусировки.
2. Алгоритм управления и поведение системы при адаптации.
3. Влияние диафрагмы на качество адаптации.

2. Структура системы и вывод выражения для функционала фокусировки

Исследуемая адаптивная система построена по стандартной схеме и представлена на рис. 1. Для коррекции наклонов волновых фронтов 16-лучевой М-моды лазера 1

используется 16-сегментный блок 2 отражателей – пьезокорректоров. После корректоров и светоделителя 3 часть излучения поступает в измерительный канал. Фокусирующая система 4 обеспечивает фокусировку излучения в плоскости диафрагмы 5, через которую излучение принимается фотоприемником 6. Сигнал с выхода фотоприемника поступает в измерительно-вычислительный блок 7, вырабатывающий управляющие сигналы для пьезокорректоров.

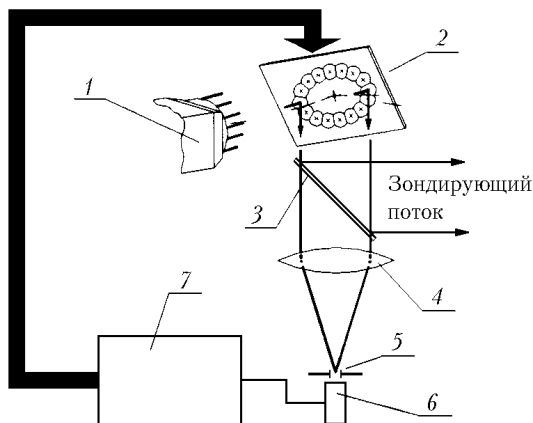


Рис. 1. Система коррекции наклона волновых фронтов многопучкового излучения лазера «Юпитер»

Экспериментальные исследования [6] свидетельствуют о том, что непараллельность исходных лучевых потоков такого лазера обусловлена главным образом их взаимными смещениями в сагиттальных плоскостях. Смещения в меридиональных плоскостях незначительны. В связи с этим в исследуемой системе принято, что конструкция сегментных отражателей – пьезокорректоров – обеспечивает их наклоны лишь относительно осей, лежащих в плоскости каждого сегмента и проходящих через центр всего блока отражателей.

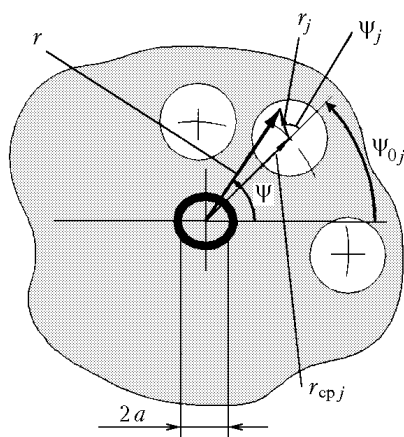


Рис. 2. Лучевые потоки в плоскости диафрагмы

Анализ качества фокусировки удобно оценивать по числу Штреля или, в более общем случае, по функционалу фокусировки [7, 8]. Данный функционал определяется отношением мощности излучения P , проходящей через малую диафрагму, расположенную в фокусе системы, к этой же мощности P_0 при точной фокусировке. Применительно к нашему случаю он может быть найден, исходя из возможных положений пучков в фокальной плоскости системы (рис. 2),

где сечение каждого лучевого потока можно считать круговым. Результаты экспериментальных исследований показывают, что под влиянием дестабилизирующих факторов и управляющих воздействий «следы» пучков в этой плоскости могут перемещаться практически только вдоль радиусов диафрагмы. В связи с этим анализ будем проводить в полярной системе координат.

Для упрощения конечных формул будем также считать, что распределение амплитуды A_j в сечении каждого пучка гауссово и одинаково для всех пучков, поскольку, как уже упоминалось, все пучки образованы одной и той же М-модой:

$$A_j = e^{-(r_j/W)^2}, \quad (1)$$

где W – радиус сечения каждого пучка в плоскости диафрагмы; r_j – текущая радиальная координата точки в сечении пучка, j – номер пучка ($j = 1, 2, \dots, 16$).

Из рис. 2 на основе геометрических соображений достаточно просто выводится формула для r_j :

$$r_j = \sqrt{r^2 + r_{cpj}^2 - 2r r_{cpj} \cos(\psi - \psi_{0j})}, \quad (2)$$

где r и ψ – текущий радиус и полярный угол (переменные интегрирования); ψ_{0j} – угол расположения центра каждого лучевого потока в плоскости диафрагмы; ψ_j – угловая координата текущей точки в собственной системе координат каждого лучевого потока; r_{cpj} – расстояния между центрами пучков и центром диафрагмы.

Будем считать, что пучки сфокусированы в плоскости перетяжек, т.е. там, где сечение пучка минимально. В этом сечении волновой фронт плоский, но в каждом пучке он наклонен по отношению к плоскости фокуса на некоторый угол, тангенс которого равен отношению R_{cp} к f , где R_{cp} – средний радиус кольца излучения на входе в фокусирующую систему, а f – фокусное расстояние системы. При этом плоскость волнового фронта ортогональна оси распространения каждого пучка. Поэтому фаза пучка в фокальной плоскости (в системе координат r_j и ψ_j) меняется по закону

$$\Phi_j(r_j, \psi_j) = \frac{2\pi}{\lambda} r_j \cos \psi_j \frac{R_{cp}}{f}. \quad (3)$$

Это выражение справедливо, если считать, что в осевой точке каждого пучка на плоскости фокусировки фаза волнового фронта равна нулю. Поскольку обычно $f \gg R_{cp}$, то эллиптичностью сечений пучков будем пренебрегать, считая распределение поля осесимметричным с амплитудой, определяемой формулой (1).

Из рис. 2 также нетрудно вывести выражение

$$\cos \psi_j = \frac{r^2 + r_j^2 - 2r r_j}{2r r_j} \cos(\psi - \psi_{0j}) - \frac{r_{cpj} \sin(\psi - \psi_{0j})}{r_j} \sin(\psi - \psi_{0j}). \quad (4)$$

Формула для мощности P в пределах диафрагмы имеет следующий вид:

$$P \approx \int_0^a \int_0^{\psi_{\max}} \left| \sum_{j=1}^{2N} A_j(r, \psi) e^{i\Phi_j(r, \psi)} \right|^2 r dr d\psi, \quad (5)$$

где a – радиус диафрагмы; ψ_{\max} в общем случае равен 2π .

Индекс N в соответствии с [4, 5] определяет количество пятен излучения на выходном зеркале лазера. Для нашего случая $N = 8$ (16 пучков).

Выражение для функционала фокусировки представим в виде

$$J_d = P/P_0, \quad (6)$$

где P_0 – мощность излучения, проходящего через диафрагму, для случая, когда все пучки сведены в центр диафрагмы ($r_{cpj} = 0$).

3. Свойства функционала фокусировки

Для обоснованного выбора алгоритма адаптации предварительно необходимо выяснить поведение функционала фокусировки.

В рассматриваемой системе возможны два варианта управления. В первом из них каждый последующий лучевой поток сводится в центр диафрагмы только после полного сведения предыдущего. Во втором варианте в центр диафрагмы сводятся все пучки, при этом каждый шаг управления для текущего пучка выполняется после завершения очередного (одного) шага для предыдущего. Первый вариант будем называть алгоритмом «последовательного» управления, второй алгоритмом «параллельного» управления.

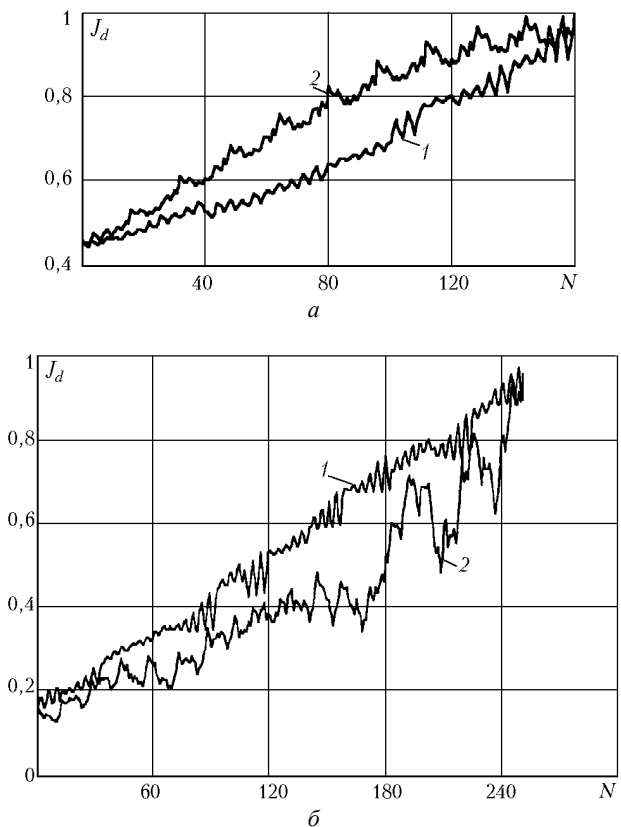


Рис. 3. Зависимость функционала фокусировки от шага изменения r_{cpj} : a – одинаковое начальное расположение пучков в плоскости диафрагмы; b – случайное начальное расположение пучков; 1 – «последовательное» изменение r_{cpj} , 2 – «параллельное»

Для оценки свойств функционала фокусировки была разработана программа по вычислению значений выражения (6) при монотонном изменении расстояния между центром диафрагмы и центром каждого j -го пучка. Результаты расчетов представлены на рис. 3. При этом для каждого пучка величина r_{cpj} принудительно менялась от некоторого начального значения до нуля с шагом 0,02 мм. Номера шагов указаны по оси абсцисс. Графики построены для обоих вариантов («последовательного» и «параллельного») изменения r_{cpj} для двух случаев: когда все пучки имеют одно и то же начальное расположение ($r_{cpj \text{ нач}} = 0,2$ мм) и когда начальное расположение всех пучков в плоскости диафрагмы случайно. В первом случае (рис. 3,а) при одном и том же начальном расположении пучков для их сведения в центр требуется 160 расчетных шагов (каждому пучку требуется 10 шагов изменения r_{cpj} , чтобы достичь центра диафрагмы). Во втором случае (с учетом того, что $r_{cpj \text{ нач}}$ в плоскости диафрагмы меняется от 0 до 0,5 мм [5]) для одного из случайных наборов $r_{cpj \text{ нач}}$ зависимость, показанная на рис. 3,б, имеет число шагов изменения r_{cpj} , равное 251.

Из представленных на рис. 3 расчетных данных следует, что функционал фокусировки при изменении r_{cpj} имеет один глобальный максимум и достаточно много локальных. Зависимости существенно немонотонны. Однако «последовательный» алгоритм характеризуется меньшей изрезанностью J_d в зависимости от r_{cpj} по сравнению с «параллельным».

Таким образом, выполненные расчеты свидетельствуют о том, что для данной системы целесообразно использовать «последовательный» алгоритм управления. Кроме того, ясно, что использование для адаптации простого градиентного метода будет неэффективно, поскольку этот метод обеспечивает «восхождение» только на ближайший максимум.

4. Алгоритм управления и поведение системы при адаптации

Существенная немонотонность функционала фокусировки в зависимости от управляющих воздействий существенно затрудняет выбор алгоритма управления. Величина функционала фокусировки J_d определяется взаимным расположением пучков. В нашем случае при заданном радиусе диафрагмы функционал J_d зависит от 16 переменных r_{cpj} . При «последовательном» методе управления каждым пучком J_d для этого пучка является функцией только одной переменной. При этом остальные пучки не меняют своего положения. Поэтому в качестве переменной, по которой ищется максимальное значение J_d , удобно использовать не текущее положение центра пучка r_{cpj} , а величину вносимого пробного возмущения u , такую, что

$$r_{cpj} = r_{cpj \text{ нач}} - u, \quad (7)$$

где $r_{cpj \text{ нач}}$ – начальное случайное положение j -го пучка.

Процесс адаптации сводится к поиску глобального минимума J^* функции $J(u) = -J_d(u)$ с заданной точностью ε :

$$\min_{1 \leq p \leq n} J(u_p) \leq J^* + \varepsilon, \quad (8)$$

где u_p – значения переменных u в процессе адаптации; p – номер итерации; n – число итераций.

Для определения минимума $J(u)$ использовался метод покрытий [9], требующий определения постоянной Липшица L . Оценки показывают, что для функционала фокусировки, рассчитываемого по формулам (1) – (6), значение $L = 3,97$. В расчетах было принято $L = 4$. Вычисления проводились с точностью $\varepsilon = 0,005$. В соответствии с «последовательным» алгоритмом для каждого пучка вычислялось такое положение его центра, при котором J_d достигал максимального значения, хотя, как выяснилось в процессе моделирования, это положение не соответствует центру диафрагмы. Процесс завершался, когда заканчивалось управление 16-м пучком.

При численном моделировании использовались следующие параметры: радиус пучка в перетяжке $W = 0,3$ мм, длина волны излучения лазера $\lambda = 10,6$ мм, фокусное расстояние системы сведения пучков $f = 304$ мм, радиус кольца излучения на входе в фокусирующую систему $R_{cp} = 40$ мм, радиус диафрагмы $a = 0,01$ мм. В таблице приведены результаты моделирования системы адаптации по приведенному выше алгоритму.

Как уже упоминалось выше и следует из представленных в таблице данных, в конечном положении пучки находятся не в центре диафрагмы, а на некотором расстоянии от него, равном приблизительно 0,04 мм. Тем не менее, хотя использованный алгоритм не позволяет добиться точной фокусировки пучков в центр диафрагмы, пространственные характеристики излучения существенно улучшаются.

| Номер пучка | Число шагов адаптации | $r_{срj нач}$, мм | $r_{срj кон}$, мм | J_d | $\Psi_{j нач}$ | $\Psi_{j кон}$ |
|-------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------|----------------|----------------|
| 1 | 29 | 0,08 | 0,042 | 0,058 | $\pi/8$ | $\pi/8$ |
| 2 | 25 | 0,06 | 0,041 | 0,083 | $2\pi/8$ | $2\pi/8$ |
| 3 | 26 | 0,18 | 0,035 | 0,124 | $3\pi/8$ | $\pi + 3\pi/8$ |
| 4 | 24 | 0,10 | 0,04 | 0,181 | $\pi/2$ | $\pi + \pi/2$ |
| 5 | 25 | 0,24 | 0,036 | 0,262 | $5\pi/8$ | $\pi + 5\pi/8$ |
| 6 | 30 | 0,06 | 0,038 | 0,326 | $6\pi/8$ | $\pi + 6\pi/8$ |
| 7 | 27 | 0,20 | 0,039 | 0,353 | $7\pi/8$ | $\pi + 7\pi/8$ |
| 8 | 22 | 0,10 | 0,04 | 0,434 | π | 2π |
| 9 | 29 | 0,04 | 0,039 | 0,436 | $9\pi/8$ | $\pi/8$ |
| 10 | 29 | 0,04 | 0,039 | 0,438 | $10\pi/8$ | $2\pi/8$ |
| 11 | 26 | 0,28 | 0,04 | 0,486 | $11\pi/8$ | $11\pi/8$ |
| 12 | 34 | 0,04 | 0,037 | 0,483 | $3\pi/2$ | $12\pi/8$ |
| 13 | 30 | 0,06 | 0,041 | 0,573 | $13\pi/8$ | $13\pi/8$ |
| 14 | 31 | 0,16 | 0,042 | 0,758 | $14\pi/8$ | $14\pi/8$ |
| 15 | 30 | 0,18 | 0,044 | 0,881 | $15\pi/8$ | $15\pi/8$ |
| 16 | 36 | 0,06 | 0,038 | 0,999 | 2π | 2π |

5. Влияние диафрагмы на качество адаптации

Оценка качества фокусировки по числу Штреля предполагает «нулевые» размеры диафрагмы в измерительном канале, поскольку, строго говоря, число Штреля определяется осевой интенсивностью излучения, т.е. точно в центре диафрагмы. В реальных системах, в связи с требованием заметного превышения регистрируемой мощности над уровнем фона, диафрагма не может быть очень малой. В связи с этим возникает вопрос – до каких значений можно увеличивать размер диафрагмы, не снижая при этом качества фокусировки?

Численные эксперименты показывают, что при различных параметрах лучевых потоков (количестве пучков, размерах их сечений в плоскости диафрагмы, длине

волны и т.д.) допустимые размеры диафрагмы различны. Поэтому проведение соответствующих исследований необходимо в каждом конкретном случае.

Для примера на рис. 4 представлены зависимости функционала фокусировки J_d (по завершении процесса адаптации) от радиуса диафрагмы. Расчеты проводились для параметров пучков, принятых при моделировании «последовательного» алгоритма (см. таблицу), при трех независимых начальных распределениях пучков $r_{срj}$.

Как видно из рис. 4, при радиусе диафрагмы $a \approx 0,2$ мм величина функционала фокусировки J_d становится заметно больше 1, т.е. превышает значение J_d при «нулевом» положении центров пучков. Это явление объясняется следующим образом. С увеличением размеров диафрагмы сквозь нее проходит излучение боковых максимумов распределения интенсивности, величина которых (в случае, когда процесс адаптации еще не завершён) сравнима с центральным. Фотоприемник измеряет полную мощность, прошедшую через диафрагму. Алгоритм управления «стремится» максимизировать эту мощность, которая вследствие интерференции, обуславливающей не нулевую интенсивность излучения у краев диафрагмы, может оказаться существенно больше той, которая имеет место при точной фокусировке пучков, хотя интенсивность в центральной части диафрагмы при этом оказывается много меньше. Для принятых в численном эксперименте параметров пучков максимальный радиус диафрагмы a , при котором адаптация осуществляется с необходимым качеством, равен $\approx 0,02$ мм.

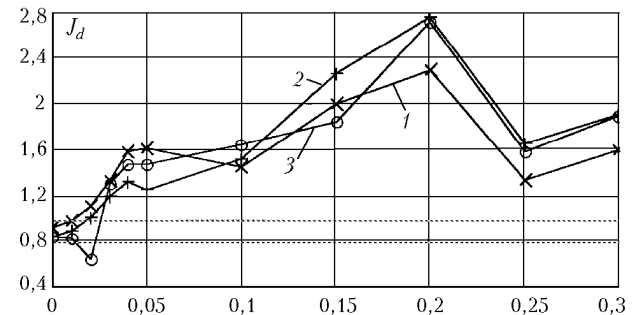


Рис. 4. Значения функционала фокусировки (по завершении процесса адаптации) в зависимости от радиуса диафрагмы. Графики 1, 2, 3 соответствуют различному начальному положению лучевых потоков

Заключение

Результаты исследований системы коррекции наклонов волновых фронтов многопучкового лазера позволяют сделать следующие выводы.

1. Получено выражение для функционала фокусировки, определяющего качество многопучкового излучения коаксиальных лазеров, работающих на М-модах.

2. Установлено, что зависимость функционала фокусировки от переменных управления является существенно немонотонной функцией, в связи с чем отсутствует возможность использования для адаптации простого градиентного метода.

3. Для поиска глобального максимума функционала фокусировки возможно использование метода покрытий, для которого с учетом конкретных параметров пучков вычислена постоянная Липшица.

4. Установлено, что размер диафрагмы в измерительном канале существенно влияет на эффективность адаптации. При больших диафрагмах функционал фокусировки в процессе адаптации может оказаться заметно больше единицы, хотя качество излучения будет при этом низким.

1. *Воронов В.И.* Структура мод и характеристики излучения в дальней зоне широкоапертурных коаксиальных лазеров // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 3. С. 397–401.
2. *Волковицкий О.А., Седунов Ю.С., Семенов Л.П.* Распространение интенсивного лазерного излучения в облаках. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 312 с.
3. *Аскаръян Г.А.* // ЖЭТФ. 1968. Т. 55. № 4. С. 1400–1403.
4. *Воронов В.И.* Пространственные характеристики многоходовых мод в лазерах с активным объемом кольцевого

сечения // Журнал технической физики. 1995. Т. 65. № 7. С. 98–107.

5. *Воронов В.И., Большаков С.С., Ляпахин А.Б., Польский Ю.Е., Ситенков Ю.Е., Урываев В.Е., Хохлов Ю.М.* СО₂-лазер с активным объемом кольцевого сечения // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 3. С. 162–167.
6. *Воронов В.И.* Численное моделирование сложных лазерных резонаторов и систем формирования излучения на основе методов лучевой и дифракционной оптики: Докт. дис. Казань: Казан. техн. ун-т, 1997. 307 с.
7. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
8. *Тараненко В.Г., Шанин О.И.* Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.
9. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 552 с.

V.I. Voronov, V.V. Trofimov. Adaptive control over beam fluxes of a multibeam laser.

The results of modeling of the adaptive system for correcting the wave front tilts of a multibeam laser are presented. As the acting element, the sector mirror is used, each sector of which operates with its beam flux. The model of the system is worked out, and maximally permitted sizes of the aperture are determined allowing the required quality of correction. The results of numerical study of the system with 16-beam laser are presented.