М.А. Воронцов, А.В. Разгулин

СИНТЕЗ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛОСКУЮ ОБЛАСТЬ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Для эффективного решения целого ряда задач лазерной технологии необходимо обеспечить вполне определенное пространственное распределение интенсивности излучения на поверхности обрабатываемой детали. В какой-то мере эти задачи могут быть решены с помощью элементов плоской оптики (фокусаторов излучения) [1, 2].

При расчете фокусаторов обычно предполагается, что среда распространения излучения является линейной. В то же время в практических системах распространение лазерного излучения часто сопровождается нелинейными эффектами, среди которых основную роль играет тепловое самовоздействие световых пучков [3]. Тепловое самовоздействие существенным образом изменяет характеристики излучения, приводит к значительным искажениям амплитудно-фазового профиля пучка. Заметим, что существующие методы расчета фокусаторов не позволяют учесть нелинейные искажения и внести соответствующие коррективы в фазовую функцию фокусатора.

В настоящей работе предложена методика расчета фокусаторов излучения в плоскую область в условиях сильных нелинейных искажений световых пучков.

Предположим, что световой пучок с начальным профилем интенсивности $I_o(x, y)$ распространяется в условиях стационарного теплового самовоздействия, обусловленного движением в поперечном направлении газового потока с постоянной скоростью v_o. Такая ситуация возникает при использовании газовых струй, обдувающих поверхность обрабатываемой детали, или при сканировании пучка вдоль поверхности. Ставится задача расчета фазовой функции $u=u(x, y)$ фокусатора, обеспечивающего в условиях теплового самовоздействия получение заданного распределения интенсивности $I_{эт.}(x, y)$ на расстоянии $z=z^o$ от фокусатора. Основой построения алгоритма решения задачи является градиентный метод минимизации функционала невязки

$$J(u) = \int_{\Omega} |I(x, y, z^o)-I_{эт.}(x, y)|^2 dxdy.$$

Функция $I(x, y, z^o) = |A(x, y, z^o)|^2$ находится из решения задачи распространения излучения для некоторой оценки фазы $u(x, y)$. Для комплексной амплитуды поля $A(x, y, z)$ и отклонения $T(x, y, z)$ температуры среды от равновесного значения в приближении квазиоптики можно записать следующую систему уравнений:

$$2i \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp}A + RTA, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = |A|^2, \qquad (2)$$

где $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2$ - оператор Лапласа по поперечным координатам. Соотношения (1)-(2) записаны в безразмерном виде. Переменные x, y нормированы на начальный радиус светового пучка a_o, переменная z - на дифракционную длину $L_g=ka_o^2$, $k=2\pi/\lambda$ - волновое число. Функции A и T нормированы на некоторые масштабные коэффициенты, явные выражения для которых приведены в [3]. Сила проявления нелинейных эффектов определяется величиной безразмерного коэффициента $|R|$ (в случае тепловой дефокусировки $R<0$).

Уравнения (1)-(2) рассматриваются в ограниченной области $Q=\Omega\times(0, z^o)$ ($\Omega=(-D, D)\times(-D, D)$, $D=2$, $\partial\Omega$ - граница Ω) совместно с начальными и граничными условиями

$$A|_{\partial\Omega\times(0, z^o)}=0, \quad T|_{x=-D}=0, \qquad (3)$$

$$A|_{z=0}=A_o(x, y)\exp\{iu(x, y)\}, \qquad (4)$$

где начальный амплитудный профиль $A_o(x, y)$ задан, а фазовый фронт $u=u(x, y)$ является управлением.

Отметим, что при управлении начальной фазой оптического излучения необходимо учитывать наличие ограничений, связанных с техническими возможностями изготовляемых фокусаторов. В ряде случаев эти ограничения можно учесть выбором фазы в виде разложения

$$u(x,\ y)\ =\ \sum_{n=1}^{N} u_n S_n(x,\ y), \tag{5}$$

где $S_n(x,\ y)$ - некоторая система функций, описывающая аберрации оптической системы, а коэффициенты $\{u_n\}_{n=1}^{N}$ являются управлениями. Таким образом приходим к задаче минимизации

$$J(\{u_n\}) \to \inf_{\{u_n\}},$$

для решения которой воспользуемся градиентным методом [4], состоящим в построении последовательности управлений $u^k=\{u_n^k\}_{n=1}^{N}$, минимизирующих функционал J, по правилу

$$u^{k+1}=u^k-\alpha_k\ \frac{\partial J}{\partial u}(u^k). \tag{6}$$

Шаг метода α_k выбирается из условия убывания функционала $J(u^{k+1})<J(u^k)$, а градиент $\frac{\partial J}{\partial u}\ =\ \{\frac{\partial J}{\partial u_n}\}_{n=1}^{N}$ функционала J с учетом (1)-(5) определяется из соотношений

$$\frac{\partial J}{\partial u_n}\ =\ -\mathrm{Im}\int_{\Omega}\Psi(x,\ y,\ 0)\,A(x,\ y,\ 0)\,S_n(x,\ y)dxdy,\ n=\overline{1,N}, \tag{7}$$

где $\Psi=\Psi(x,\ y,\ z)$ - решение задачи, "сопряженной" к (1)-(4)

$$2i\ \frac{\partial \Psi}{\partial z}\ +\ \Delta_{\perp}\Psi\ +\ RT\Psi\ +\ 2iRA^*G=0,\ \Psi|_{\partial\Omega\times(0,\ z^{\circ})}=0,$$

$$\frac{\partial G}{\partial x}\ +\ \mathrm{Im}(\Psi A)=0,\ G|_{x=D}=0,$$

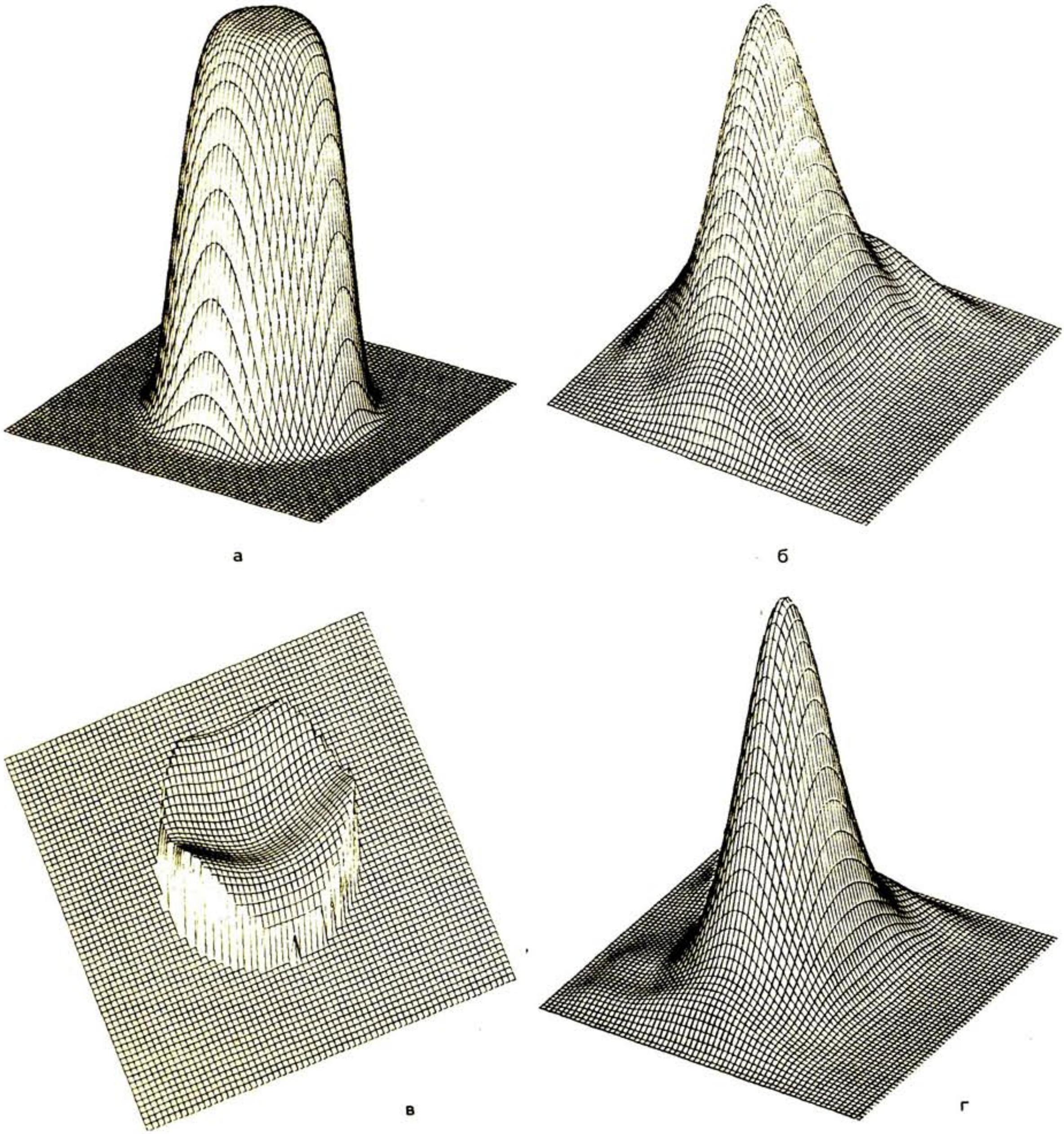
$$\Psi|_{z=z^{\circ}}=4(I(x,\ y,\ z^{\circ})-I_{\text{эт.}}(x,\ y))A^*(x,\ y,\ z^{\circ}).$$

Остановимся на результатах численного моделирования. В качестве начальной амплитуды A_o в (4) было взято гипергауссово распределение

$$A_o(x,\ y)=\exp\{\tfrac{1}{2}(x^2+y^2)^3\}. \tag{8}$$

Выбор $A_o(x,\ y)$ вида (8) обеспечивает выполнение граничного условия (3) с достаточной степенью точности. В разложении фазы $u(x,\ y)$ в (5) использовались полиномы Цернике $\{Z_n(x,\ y)\}$, $n=\overline{1,21}$, которые представляют собой систему функций, ортогональных в единичном круге, и описывают классические аберрации оптических систем. Длина трассы $z^{\circ}=0,3$. Распределение интенсивности $I_{\text{эт.}}(x,\ y)$ в плоскости приемной апертуры при $z=z^{\circ}$ совпадало с $|A_o(x,\ y)|^2$, то есть требовалось найти фазовую функцию $u(x,\ y)$ фокусатора, обеспечивающего при $z=z^{\circ}$ наилучшую компенсацию искажений начального профиля интенсивности оптического излучения, распространяющегося в нелинейной среде.

При численной реализации градиентного метода (6)-(7) для решения прямой и сопряженной задач были использованы нелинейные чисто неявные проекционно-разностные схемы, для разрешения которых на каждом расчетном слое по z использовались итерации в сочетании с алгоритмом быстрого преобразования Фурье. Вопросы устойчивости и сходимости этих схем рассматривались в [5]. Результаты оптимизации по методу (6)-(7) для случая R=-20 иллюстрируются на рисунке (а-г). На рис. а представлено начальное распределение интенсивности $|A_o(x,\ y)|^2$. Профили интенсивности $I(x,\ y,\ z^{\circ})$ для начального приближения управления и после оптимизации изображены на рисунках б, г. При этом целевой функционал J уменьшился на 44%. Характерный профиль полученной фазовой функции в пределах единичного круга представлен на рис. в. Из рисунка видно, что при управлении фазой удается почти полностью скомпенсировать боковое смещение пучка, вызванное движением среды, и частично уменьшить его периферийные искажения. Полученные результаты свидетель-



Фокусировка излучения в нелинейной среде: а - начальное распределение интенсивности ($z=0$); б - распределение интенсивности при $z=z^{\circ}$ для начального приближения управления; в - фазовый профиль формирующего элемента; г - распределение интенсивности при $z=z^{\circ}$ после оптимизации

ствуют об эффективности использования градиентных методов для расчета фокусаторов излучения в нелинейных средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончарский А.В., Сисакян И.Н., Степанов В.В. // ДАН СССР, 1984, т. 279, с. 68.

2. Воронцов М.А., Матвеев А.Н., Сивоконь В.П. // ДАН СССР, 1986, т. 290, с. 1354.

3. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.

4. В а с и л ь е в Ф.П. Методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1981, 400 с.
5. Р а з г у л и н А.В. Задача оптимального управления для одного нелинейного уравнения типа Шредингера // Актуальные проблемы моделирования и управления системами с распределенными параметрами: Всес. конф. (Тез. докл.). Киев, 1987, с. 34.