

И.Е. Тельпуховский, С.С. Чесноков

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ ПРИ МОДАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ

На основе численной модели адаптивной системы апертурного зондирования проведен анализ зависимости критерия фокусировки пучка от числа используемых в управлении волновым фронтом базисных мод. Установлено, что предельно достижимая степень компенсации тепловой дефокусировки определяется произведением длины трассы и параметра нелинейности. С уменьшением длины трассы одновременно возрастает относительный вклад мод третьего и четвертого порядка.

Проблема повышения эффективности адаптивных оптических систем включает в себя широкий круг задач как теоретического, так и прикладного характера. Теоретический анализ, базирующийся на численном моделировании, открывает возможность оптимизации адаптивных систем в целом классе параметров. В первую очередь представляет интерес определение оптимального базиса управления волновым фронтом, пучка, а также поиск алгоритмов управления, обладающих наибольшим быстродействием и устойчивостью. Настоящая статья посвящена развитию исследований по перечисленным направлениям.

Математическая модель и алгоритмы управления в адаптивной системе

С целью наиболее надежного и экономичного определения предельных возможностей управления ограничимся задачей о компенсации стационарной ветровой рефракции гауссовского пучка. Эта задача описывается системой безразмерных уравнений

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + RTE, \\ \frac{\partial T}{\partial x} = EE^*,$$

причем поле на передающей апертуре задается в виде

$$E(x, y, 0) = \exp [- (x^2 + y^2)/2 + iU(x, y)] .$$

Управляемый волновой фронт $U(x, y)$ представляется в виде суперпозиции низших оптических мод

$$U(x, y) = \sum_{j=3}^7 a_j z_j(x, y),$$

где $z_3 = 2r^2 - 1$ — дефокусировка; $z_4 = x^2 - y^2$ — астигматизм; $z_5 = (3r^2 - 2)x$ — кома; $z_6 = (x^2 - 3y^2)x$ — кома; $z_7 = 6(r^4 - r^2)$ — сферическая aberrация; $r^2 = x^2 + y^2$. С целью сокращения вычислительных затрат из базиса управления исключена дисторсия, которая в стационарных условиях может быть легко определена из геометрических соображений.

Управляемые координаты a_j ($j = 3, 4, 5, 6, 7$) подбирались из условия минимума энергетического радиуса пучка в плоскости наблюдения $z = z_0$:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{P_0} \int \int [(x - x_c)^2 + y^2] |E|_{z=z_0}^2 dx dy \right\}^{1/2}$$

где P_0 — полная мощность в пучке,

$$x_c = \frac{1}{P_0} \int \int x |E|_{z=z_0}^2 dx dy -$$

смещение энергетического центра. Оптимизация фазы проводилась методом покоординатного спуска Хука—Дживса [1], который, как установлено при численном моделировании, позволяет сократить число измерений целевой функции по сравнению с градиентной процедурой в число раз, близкое числу управляемых координат. В точке минимума а проводилась обработка светового поля в плоскости наблюдения, в результате которой вычислялись предельные энергетические характеристики пучка $[\sigma, x_c, J_f]_{opt}$, причем критерий фокусировки определялся с учетом наветренного смещения пучка

$$J_f = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x - x_c, y, S_t) |E|_{z=z_0}^2 dx dy .$$

где ρ — апертурная функция в плоскости наблюдения; S_t — ее эффективный радиус.

Результаты численного анализа

Большой практический интерес представляет оценка оптимального числа каналов управления в адаптивной системе, достаточного для улучшения энергетических характеристик пучка в плоскости наблюдения до заданной величины. С этой целью целесообразно в первую очередь исследовать относительный вклад в качество коррекции мод различного порядка в зависимости от таких параметров распространения, как длина трассы и мощность излучения. Для усредненного описания структуры поля на объекте целесообразно воспользоваться критерием фокусировки J_f , вычисленным при ряде значений радиуса приемной апертуры S_t , отнесенных к радиусу дифракционно ограниченного фокального пятна в вакууме a_d . Оценку качества коррекции при разной размерности базиса управления удобно провести, используя нормализованную величину

$$\eta = J_f / (J_f)_{max} ,$$

где $(J_f)_{max}$ — предельное значение критерия фокусировки, найденное при максимальном числе базисных мод (вплоть до четвертого порядка включительно).

Расчетные зависимости $\eta(S_t)$, полученные на трассе длиной $z_0 = 0,5$ при двух значениях параметра нелинейности $R = -20$ и $R = -40$, представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Парное сравнение кривых на этих рисунках показывает, что на протяженной трассе с ростом мощности излучения возрастает роль мод высшего порядка. Наиболее отчетливо это видно на рис. 3, где представлены зависимости критерия фокусировки J_f в круге удвоенного дифракционного радиуса от параметра нелинейности R при $z_0 = 0,5$. Для сравнения там же приведена та же зависимость для случая идеального корректора с бесконечным числом степеней свободы [2]. Если при малой нелинейности ($|R| = 10$) практически полная компенсация достигается управлением только кривизной волнового фронта, то при сильной нелинейности ($|R| = 40$) для приемлемой локализации поля необходимо привлекать моды до четвертого порядка включительно. Интересно отметить, что в рассматриваемых условиях управление модами третьего и четвертого порядка практически эквивалентно.

При распространении сильно сфокусированных пучков на коротких трассах наведенная тепловая линза имеет более сложную пространственную структуру, чем в рассмотренном выше случае. Следует ожидать, что в условиях острой фокусировки возрастает относительный вклад моды четвертого порядка.

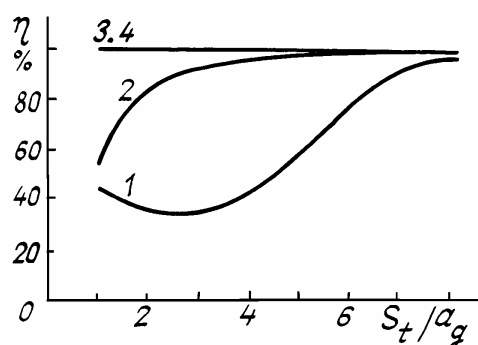


Рис. 1. Зависимости нормализованного критерия качества коррекции η от радиуса приемной апертуры S_t при разном числе используемых мод. Кривая 1 — без коррекции, 2 — моды второго порядка, 3, 4 — соответственно моды до третьего и четвертого порядка включительно. Длина трассы $z_0 = 0,5$; параметр нелинейности $R = -20$

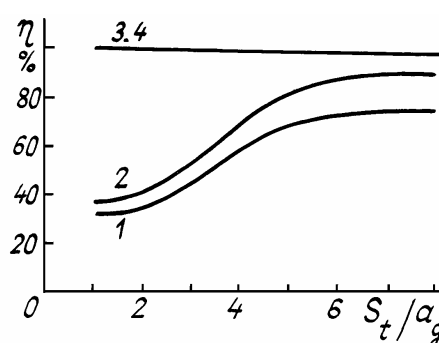


Рис. 2. Зависимости нормализованного критерия качества коррекции η от радиуса приемной апертуры S_t при разном числе используемых мод. 1 — без коррекции; 2 — моды второго порядка; 3, 4 — соответственно моды до третьего и четвертого порядка включительно. Длина трассы $z_0 = 0,5$; параметр нелинейности $R = -40$

Расчетные данные по компенсации ветровой рефракции на трассе $z_0 = 0,2$ с параметром нелинейности $R = -100$ приведены на рис. 4, структура и обозначения которого аналогичны рис. 1, 2. Видно, что управление модами второго и третьего порядка в данном случае одинаково малоэффективно. Основной вклад в концентрацию поля действительно обеспечивает управление сферической абберацией.

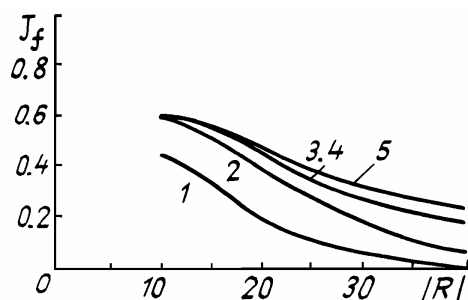


Рис. 3. Критерий фокусировки J_f в круге радиуса $S_t = 2a_d$ в зависимости от параметра нелинейности R . Кривая 1 — без коррекции; 2 — моды второго порядка; 3, 4 — соответственно моды до третьего и четвертого порядка включительно; 5 — идеальный корректор. Длина трассы $z_0 = 0,5$

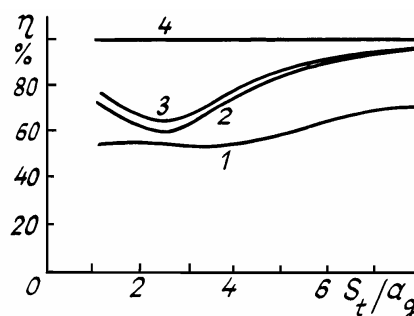


Рис. 4. Зависимости нормализованного критерия качества коррекции η от радиуса приемной апертуры S_t при разном числе используемых мод. Кривые 1 — без коррекции; 2 — моды второго порядка; 3, 4 — соответственно моды до третьего и четвертого порядка включительно. Длина трассы $z_0 = 0,2$; параметр нелинейности $R = -100$

Кроме оценки относительного вклада различных мод в локализацию поля на объекте, представляет также интерес определение предельно достижимой идеальным корректором компенсации тепловой дефокусировки в зависимости от длины трассы и параметра нелинейности. Расчеты, проделанные в широком диапазоне изменения z_0 и R показывают, что основным параметром, определяющим предельно возможную компенсацию, является произведение $\zeta = |R|z_0$. Так, например, при $\zeta \approx 5$ относительная доля световой мощности, которая может быть доставлена в апертуру радиуса $S_t = 2a_d$, не превышает 75%, при $\zeta \approx 10-50$, а при $\zeta \approx 20-25\%$, причем эти данные практически не зависят от длины трассы z_0 . В то же время, чем меньше z_0 , тем более высокого порядка моды необходимо использовать при управлении для достижения указанной выше степени компенсации.

Таким образом, исследования зависимости предельно достижимого критерия фокусировки от числа используемых базисных мод показали, что в отличие от случая длинных трасс и умеренной нелинейности среды, когда достаточно управлять наклоном, кривизной и астигматизмом волнового фронта, в случае коротких трасс возрастает относительный вклад мод третьего и четвертого порядка. При этом расширение размерности базиса управления от 3 до 8 повышает концентрацию поля на объекте на 20–30%. Предельно достижимая степень компенсации тепловой дефокусировки определяется единственным параметром $\zeta = |R|z_0$.

1. Brent R. Algorithms for Minimization without Derivatives. N. Y.: Prentice-Hall. 1973.
2. Воронцов М. А., Чесноков С. С. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 11. С. 1318.

Московский госуниверситет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
2 октября 1991 г.

I. E. Telpukhovskii, S. S. Chesnokov. **Extreme Possibilities of Adaptive Correction of wind Refraction Using a Modal Control.**

The dependence of the light beam focusing criterion on the number of basic mode used for the wave-front control is analyzed using the numerical method. It is found that extremely available degree of the thermal blooming compensation is determined by a product of the propagation path length and nonlinearity parameter. With decrease in the propagation path length the relative contribution of the modes of the third and fourth orders increases.