

И.В. Малафеева, И.Е. Тельпуховский, С.С. Чесноков

СИМПЛЕКС-МЕТОД В ЗАДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ТЕПЛООВОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ ФЛУКТУАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА ТРАССЕ

Средствами численного моделирования выполнено исследование применимости симплексного поиска в задаче о компенсации теплового самовоздействия лазерного пучка в случайно-неоднородной среде. Предложен алгоритм, повышающий эффективность управления фазой пучка. Проведено сравнение с градиентной процедурой. Показана устойчивость симплекс-метода в случае умеренной турбулентности и при флуктуациях скорости ветра.

Для компенсации искажений световой волны, вызванных нелинейной рефракцией и турбулентными флуктуациями показателя преломления среды, в настоящее время используются адаптивные методы управления фазой световых пучков [1], среди которых широкое распространение получил принцип апертурного зондирования. Применение апертурного зондирования в сочетании с градиентной процедурой поиска экстремума освещенности объекта рассмотрено в [2, 3] для коррекции тепловой дефокусировки пучков, распространяющихся в среде с пульсациями скорости. Как установлено в [3], эффективное управление пучком при высокочастотных пульсациях скорости возможно лишь с помощью быстрых вариаций фазы (зондирование по неустановившимся параметрам светового поля в среде), что накладывает жесткие требования на быстродействие исполнительных элементов адаптивной системы. В связи с этим представляется целесообразным привлечь для управления световыми пучками методы, не требующие вычисления градиента целевой функции, в частности, симплексный поиск [4]. Сравнительный анализ алгоритмов компенсации стационарной ветровой дефокусировки [5] показывает, что симплекс-метод обеспечивает наибольшую скорость сходимости итерационного процесса оптимизации фазы. В режиме нестационарной ветровой рефракции [6] скачкообразное изменение координат управления, характерное для симплекс-метода, приводит к принудительному сканированию пучка, ухудшающему условия распространения.

Приведенные соображения дают основания полагать, что в задаче динамической коррекции искажений светового пучка, распространяющегося на атмосферной трассе в присутствии пульсаций скорости ветра и флуктуаций показателя преломления, симплекс-метод окажется достаточно эффективным.

Настоящая статья посвящена численному анализу процесса управления фазой интенсивного светового пучка адаптивной оптической системой. Рассмотрен режим нестационарной ветровой рефракции в турбулентной атмосфере со случайным ветром. Исследована эффективность симплексного поиска максимума освещенности объекта в реальном времени в зависимости от базиса управления. Проведено сравнение с градиентным методом.

1. Модель распространения светового пучка

При построении численной модели будем полагать, что на выходной апертуре лазерного источника формируется одномодовый пучок гауссовского профиля $E_0 = A_0 \exp(-(x^2 + y^2) / 2a_0^2)$. Управление волновым фронтом пучка производится с помощью модального корректора (упругого зеркала), при отражении от которого коллимированный пучок приобретает фазу

$$U(x, y, t) = \kappa \sum_{i=1}^N a_i(t) W_i(x, y), \quad (1)$$

где κ — волновое число; a_i — управляемые коэффициенты; W_i — базисные моды; N — число координат управления. Комплексная амплитуда светового поля E на входе в среду (в плоскости $z = 0$) определяется как

$$E(x, y, 0, t) = E_0(x, y) \exp(iU(x, y, t)). \quad (2)$$

Целевой функцией управления является критерий фокусировки J_f [1], вычисляемый в апертуре с радиусом a_0 .

В квазиоптическом приближении теории дифракции распространение пучка в слабопоглощающей среде описывается уравнением

$$2i\kappa \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + 2 \frac{\kappa^2}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial T} T + \tilde{n} \right) E, \quad (3)$$

где \tilde{n} — случайное поле, описывающее естественные флуктуации показателя преломления в среде; $T = T(x, y, z, t)$ — возмущения температуры среды, наведенные пучком на трассе. Для последних справедливо уравнение теплопереноса в движущейся среде:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) T \right) = \alpha I, \quad I = \frac{cn_0}{8\pi} EE^*. \quad (4)$$

Здесь ρ — плотность; c_p — удельная теплоемкость; \mathbf{v} — скорость движения среды, которая в реальной атмосфере является случайной величиной. В соответствии со структурой атмосферной турбулентности [7] будем полагать, что \mathbf{v} имеет постоянную составляющую \mathbf{v}_0 и испытывает случайные пульсации $\delta v_x, \delta v_y, \delta v_z$. Поскольку определяющее влияние на формирование тепловой линзы в канале пучка оказывают компоненты скорости, перпендикулярные оптической оси OZ , то под v_0 будем понимать составляющую скорости, лежащую в плоскости XOY . Если направление оси OX совпадает со средней скоростью среды \mathbf{v}_0 , то $\mathbf{v} = \{v_0 + \delta v_x, \delta v_y\}$. Стандартные отклонения флуктуационных компонент считаются совпадающими по величине $\sigma_{vx} = \sigma_{vy} = \sigma_v$. Количественной мерой тепловых искажений является параметр нелинейности $R = R_0 v_0 / v$, где $R_0 = \frac{2\kappa^2 a_0^3 \alpha I_0}{n_0 \rho q_p v_0} \frac{\partial n}{\partial T}$ — величина, определяемая по средней скорости среды v_0 . Параметр R_0 пропорционален полной мощности $P_0 = \pi a_0^2 I_0$ и среднему времени взаимодействия излучения со средой $\tau_v = a_0 / v_0$.

Для моделирования флуктуаций показателя преломления среды \tilde{n} использовано модальное представление [8], позволяющее существенно расширить спектр неоднородностей в низкочастотную пространственную область. При этом в каждой плоскости $z = \text{const}$ возмущения \tilde{n} разлагаются в ряд по ортогональным полиномам Цернике Z_i в пределах некоторой апертуры радиусом R :

$$\tilde{n}(x, y) = \sum_{i=1}^I \tilde{\alpha}_i Z_i(x, y), \quad (5)$$

где случайные коэффициенты $\tilde{\alpha}_i$ распределены по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией, определяемой атмосферными условиями на трассе. Как показано в [8], в большинстве практически важных случаев достаточно ограничиться в разложении (5) полиномами первого и второго порядка ($I = 5$), при этом $R = a_0/2$.

Численное решение уравнения (3) проводилось в работе методом расщепления с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье, материальное уравнение (4) интегрировалось с помощью явной двухшаговой схемы Лакса-Вендрофа [9].

2. Алгоритм управления фазой пучка

В рассматриваемой задаче основными факторами, ухудшающими энергетические характеристики пучка в плоскости наблюдения, являются его случайные блуждания и дефокусировка. Именно эти эффекты необходимо учесть в первую очередь при разработке стратегии управления. Ранее используемая модификация алгоритма симплексного поиска [6] не может обеспечить устойчивость управления в условиях пульсаций из-за того, что в ней предусмотрено целенаправленное движение симплекса по направлению к «дрейфующей» цели. Поэтому представляется разумным применить поиск с переменной стратегией, который можно поделить на два этапа. Первый этап — это управление на начальной стадии прогрева среды (за время порядка $2\tau_v$). Здесь в силу свойств симплекс-метода и наличия сильно выраженных переходных процессов необходимо использовать алгоритм [6], и тем самым избежать «зацикливания» симплекса. Затем на втором этапе, когда преимущественное значение имеют случайные блуждания пучка и переходные процессы, возникающие при смене состояний среды, следует применить алгоритм со свободным отражением вершин. Его основное правило заключается в отражении худшей вершины симплекса без каких-либо дополнительных условий. Как будет показано ниже, такая организация управления действительно позволяет скомпенсировать случайные блуждания пучка и избежать неустойчивых режимов поиска.

3. Режим слабых флуктуаций показателя преломления

Вначале рассмотрим распространение пучка в среде с пульсациями скорости ветра на трассе, пренебрегая естественными флуктуациями показателя преломления ($\tilde{n} \approx 0$). На приземных горизонтальных трассах возможен режим достаточно частых пульсаций скорости, при которых весьма существенны переходные процессы в системе «пучок—среда». Положим, для определенности, среднее

время замороженности пульсаций равным $T_v = 2\tau_v$. Исходя из характера нелинейных искажений пучка, управляемый волновой фронт естественно выбрать в виде

$$U(x, y) = S_x \frac{x^2}{2} + S_y \frac{y^2}{2} + \theta_x x + \theta_y y, \quad (6)$$

где $S_x, S_y, \theta_x, \theta_y$ — кривизны и наклоны волнового фронта соответственно по осям OX и OY .

Однако при большом числе управляемых координат трудно провести априорный анализ траектории поиска оптимума, весьма полезный, в частности, для определения начальной конфигурации симплекса. Это особенно важно при наличии переходных процессов: первые шаги поиска должны идти в правильном направлении (например, пучок должен начать фокусироваться, а не наоборот). В четырехмерном пространстве определить это направление затруднительно. Поэтому имеет смысл уменьшить число управляемых координат, что одновременно позволит также увеличить быстродействие адаптивной системы.

Учитывая, что при наличии случайных пульсаций скорости дефокусировка пучка практически осесимметрична, уменьшение числа управляемых переменных естественно провести, введя комбинированную моду $\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2}\right)$, т.е. положить

$$U(x, y) = S\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2}\right) + \theta_x x + \theta_y y. \quad (7)$$

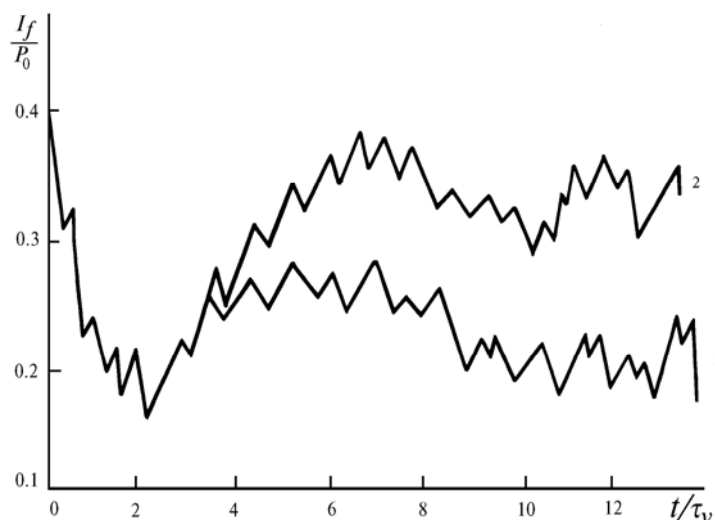


Рис. 1. Зависимость нормированного критерия фокусировки J_f от времени t при управлении в базисе (7) с постоянной (кривая 1) и переменной (кривая 2) стратегиями поиска. Момент смены стратегии: $t = 2\tau_v$. Условия распространения: $z_0 = 0,5\kappa a_0^2$, $R_0 = -20$, $\sigma_v = 0,3v_0$

Рис. 1 иллюстрирует эффективность управления пучком в базисе (7) на основе сравнения двух стратегий поиска максимума критерия фокусировки: постоянной стратегии «без заикливания» [6] и предлагаемой здесь переменной стратегии (п. 2).

В последующих численных экспериментах управление пучком рассматривалось в течение конечного промежутка времени $T = 12\tau_v$ с момента включения лазерного источника. Эффективность поиска оценивалась по суммарной световой энергии, попадающей в приемную апертуру за время T . Результаты численного моделирования показали, что оптимальный размер симплекса L_{opt} определяется только средним параметром нелинейности на трассе и может быть оценен исходя из соображений, приведенных в [6].

На рис. 2 представлена типичная зависимость J_f от времени в процессе управления. Там же приведены значения стандартного отклонения критерия фокусировки, усредненные по 120 реализациям. Установлено, что для значений $\langle R_v \rangle = -20 \dots -30$ управление на основе симплекс-метода позволяет повысить энергетические характеристики в среднем в 1,4 раза по сравнению со случаем распространения как коллимированного, так и сфокусированного пучков.

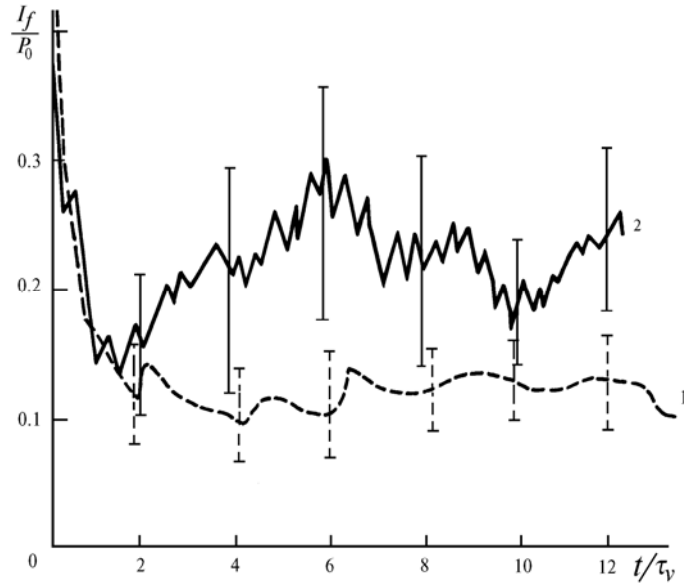


Рис. 2. Зависимость нормированного критерия фокусировки J_f от времени в одной из реализаций скорости ветра и стандартное отклонение σ_j , полученное усреднением по 120 реализациям. Кривые: 1 — без управления, 2 — управление в базисе (7). Условия распространения: $z_0 = 0,5\kappa a_0^2$, $R_0 = -30$, $\sigma_v = 0,3v_0$

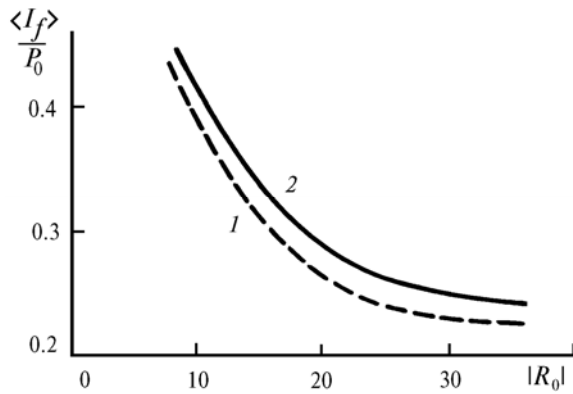


Рис. 3. Средние значения нормированного критерия фокусировки в зависимости от среднего параметра нелинейности на трассе при управлении градиентным методом в базисе (6) (штриховая кривая) и симплекс методом в базисе (7) (сплошная). Условия распространения $z_0 = 0,5\kappa a_0^2$, $\sigma_v = 0,3v_0$

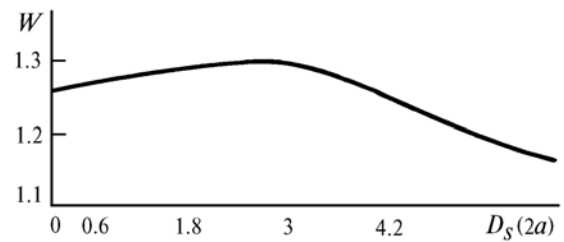


Рис. 4. Зависимость эффективности управления W от структурной функции фазы сферической волны $D_s(2a)$. Условия распространения: $z_0 = 0,5\kappa a_0^2$, $R_0 = -20$, $\sigma_v = 0,3v_0$

Сравнение с градиентной процедурой показало, что применение обоих методов позволяет достичь примерно одинаковых средних по времени значений критерия фокусировки $\langle J_f \rangle$ (рис. 3). В условиях пульсаций скорости ветра в диапазоне σ_v вплоть до $\sigma_v \leq 0,5v_0$ алгоритм симплекс-поиска устойчив, причем при увеличении σ_v стандартное отклонение критерия фокусировки практически не возрастает.

Это по-видимому, объясняется тем, что применяемый здесь алгоритм обеспечивает равномерное сканирование пучком во взаимно перпендикулярных плоскостях так, что среднее смещение центра тяжести пучка $\langle r_c \rangle \leq a_0/2$. Отметим, что при использовании градиентного метода в условиях $\sigma_v \geq 0,3v_0$ для обеспечения устойчивости требуется усложнять процедуру управления, например, применять раздельное зондирование по фокусировке и наклону [3].

4. Турбулентная атмосфера со случайным ветром на трассе

Здесь рассматривается задача о распространении пучка в случайно-неоднородной среде, описываемая уравнениями (3, 4) с учетом всех членов. Положим, что средние времена заморозенности пульсаций скорости ветра и каждой реализации поля случайных флуктуаций показателя преломления \tilde{n} одинаковы и равны $2\tau_v$, причем их смена происходит в один и тот же момент времени.

Исследование качества управления проведено в зависимости от параметра $D_s(2a)$ [10], характеризующего турбулентность атмосферы на трассе. Эффективность коррекции W оценивалась по отношению суммарной световой энергии, попадающей в приемную апертуру за время управления $T = 12 \tau_c$, к той же величине в случае распространения сфокусированного неуправляемого пучка.

Результаты расчетов для одного конкретного набора реализаций, сменяющих друг друга за время T , приведены на рис. 4. Анализ этого рисунка показывает, что управление на основе симплекс-метода устойчиво и достаточно эффективно в широком диапазоне параметра $D_s(2a)$. Однако с увеличением этого параметра качество коррекции несколько снижается. По-видимому, в этих условиях необходимо уточнить оптимальный размер симплекса.

В заключение еще раз отметим, что (наряду с уже указанными полезными свойствами симплексного поиска в рассматриваемых задачах) этот метод расширяет возможности управления пучком в реальном времени, поскольку требует примерно вдвое меньшего быстродействия системы по сравнению с градиентными процедурами.

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
2. Егоров К.Д., Чесноков С.С. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 6. С. 1269–1273.
3. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 6. С. 598–603.
4. Дамбраускас А.П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979. 168 с.
5. Малафеева И.В., Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 12. С. 1249–1253.
6. Малафеева И.В., Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. № 4. С. 413–417.
7. Ламли Дж., Пановский Г.А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
8. Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 12. С. 1294–1297.
9. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 376 с.
10. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 277 с.

Московский госуниверситет

Поступила в редакцию
5 августа 1992 г.

I. V. Malafeeva, I. E. Tel'pukhovskii, S. S. Chesnokov. **Applicability of the Simplex Method to Dynamic Correction for Thermal Blooming of Light Beams under Conditions of Fluctuating Medium Parameters along a Path.**

Applicability of the simplex search method to the problem of compensation for thermal blooming of laser radiation in a randomly inhomogeneous media is studied using numerical simulations. An algorithm, enabling one to improve the efficiency of the beam phase control is proposed. The algorithm is compared with the gradient technique. It is shown that the simplex search method is stable under conditions of moderate turbulence and fluctuating wind velocity.