

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

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ НА ОСНОВЕ СИМПЛЕКС-МЕТОДА**

Средствами численного моделирования выполнено исследование применимости симплексного поиска в задаче о компенсации теплового самовоздействия длинного светового импульса, распространяющегося в регулярной среде. Предложен алгоритм, повышающий эффективность управления фазой пучка в нестационарных условиях. Проведена оптимизация размера симплекса в зависимости от параметра нелинейности, длительности управления пучком и быстродействия адаптивной системы.

Проблема поиска новых алгоритмов управления фазой световых пучков, распространяющихся в естественных средах, представляет большой практический интерес в связи с развитием систем атмосферной оптики. В настоящее время одним из широко используемых принципов организации управления в оптических системах с обратной связью является метод апертурного зондирования, который в стационарных условиях и при отсутствии помех обеспечивает надежное отыскание экстремума критерия качества. Вместе с тем градиентные процедуры «восхождения на холм», положенные первоначально в основу апертурного зондирования зачастую оказываются малоэффективными при флуктуациях параметров пучка и среды, переходных процессах в системе «пучок-среда» и т.п.

Поэтому представляет интерес развитие методов управления фазой световых пучков на базе методов, не требующих вычисления градиента целевой функции. К таким методам относится, в частности, симплексный поиск. Предварительные исследования [1] продемонстрировали его эффективность при компенсации стационарной ветровой рефракции. Установлено, что для достижения максимума освещенности объекта фокусировки на основе симплекс-метода требуется примерно в 1,5 раза меньше измерений критерия качества управления, чем при использовании градиентного метода. Целью настоящей статьи является развитие симплекс-метода в случае динамического управления фазой пучка при нестационарной ветровой рефракции, когда локализация максимума критерия качества в пространстве координат управления существенно зависит от траектории его поиска.

**1. Модель распространения светового пучка в нелинейной среде**

Распространение пучка в движущейся слабопоглощающей среде описывается системой безразмерных уравнений

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + RTE, \quad \Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} = EE^*. \quad (2)$$

Здесь поперечные координаты  $x, y$  нормированы на начальный радиус пучка  $a_0$ , продольная координата  $z$  — на дифракционную длину  $z_d = ka^2$  ( $k$  — волновое число),  $t$  отнесено к конвективному времени  $\tau_V = a_0/V$ , где  $V$  — скорость движения среды, направленная вдоль оси  $x$ . Параметр нелинейности  $R$  пропорционален входной мощности пучка  $P_0$  и времени взаимодействия излучения со средой.

На передающей апертуре ( $z = 0$ ) формируется входное поле

$$E(x, y, 0, t) = A_0(x, y) \exp(iU(x, y, t)), \quad (3)$$

причем управляемый фазовый профиль пучка выбирается из условия максимума критерия фокусировки в плоскости наблюдения

$$J_f = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) |E(x, y, z_0, t)|^2 dx dy, \quad (4)$$

имеющего смысл относительной доли световой мощности, попадающей в заданную апертуру  $\rho(x, y)$ .

Поскольку снижение мощности на объекте связано в первую очередь с неосесимметричной дефокусировкой пучка и отклонением его от прямолинейного распространения, в качестве управляемых координат естественно использовать угол наклона пучка  $\theta$  и две кривизны волнового фронта  $S_x, S_y$ , определяющие фокусировку пучка во взаимно перпендикулярных плоскостях. В соответствии с этим

$$U(x, y, t) = \theta(t)x + 0,5(S_x(t)x^2 + S_y(t)y^2). \quad (5)$$

Численное моделирование проведено на трассе  $z_0 = 0,5$ , амплитудный профиль на входе в среду и апертурная функция объекта выбраны гауссовскими

$$A_0(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/2), \quad (6)$$

$$\rho(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)). \quad (7)$$

## 2. Алгоритм симплексного поиска при дрейфе цели

Смещение пучка в наветренную сторону в процессе развития тепловых искажений создает в пространстве управления эффект, называемый в теории оптимизации «дрейфом цели» [2]. В этих условиях управление можно представить в виде двух процессов: восхождения на «подвижный холм» и отслеживания его движения. Большая скорость дрейфа цели может явиться причиной неустойчивых режимов поиска, усложнить выбор направления шага и привести к чередованию процессов отслеживания и восхождения. Для устранения этих недостатков необходим детальный анализ стратегии поиска.

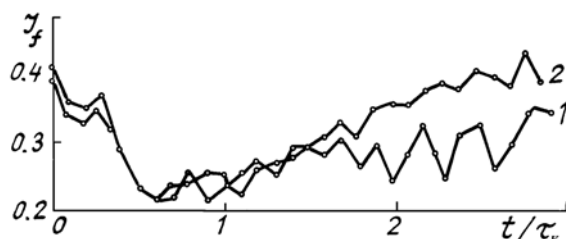


Рис. 1. Зависимость критерия фокусировки  $J_f$  от времени  $t$  при динамической компенсации нестационарной ветровой рефракции на основе симплекс-метода. Кривые 1 — алгоритм с запретом возврата, 2 — с принудительным отражением вершин. Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ;  $R = -20$

Напомним кратко основную идею симплекс-метода [2]. В соответствии с ним движение к оптимуму в пространстве  $k$  координат управления осуществляется последовательным отражением вершины симплекса, в которой текущее значение целевой функции оказалось наименьшим относительно противоположащей грани. Многократное отражение «наихудших» вершин симплекса приводит к пошаговому движению симплекса к цели по некоторой ломаной линии. Как установлено в [1], в режиме стационарной ветровой рефракции успех симплекс-поиска максимума критерия фокусировки обусловлен возможностью организации таких процедур, как запрет возврата к предыдущей конфигурации симплекса, уменьшение его размеров по мере приближения к экстремуму, пересчет целевой функции в вершине, которая в течение определенного числа шагов не заменялась своим зеркальным отображением и т.п.

В режиме нестационарной ветровой рефракции, когда местоположение максимума целевой функции существенно зависит от траектории его поиска, описанные выше процедуры являются малоэффективными. В этом случае возникает «защикливание» симплекса, то есть отсутствие отражения одной или некоторого числа вершин на протяжении определенного числа шагов  $\nu$ , из-за чего симплекс прекращает поступательное движение к цели. Поэтому более разумной оказывается стратегия, основанная на принудительном отражении «старых» вершин. Расчеты показывают, что при  $k \leq 2$  достаточно отбрасывать лишь те из них, для которых  $\nu = k+1$ . При  $k \geq 3$  наряду с этим необходимо отслеживать одновременно и те вершины, для которых  $\nu = k+3$ , так как защикливание здесь возникает около  $(k-1)$  вершин. В качестве примера на рис. 1 изображены типовые зависимости критерия фокусировки от времени при двух алгоритмах симплекс-поиска в трехмерном пространстве управлений (5): с запретом возврата и с принудительным отражением вершин. Видно, что разумная организация поиска действительно позволяет повысить эффективность динамической компенсации нестационарной тепловой линзы.

## 3. Оптимизация размера симплекса

Как установлено выше, величина и местоположение экстремума целевой функции в пространстве координат управления зависят от предыстории поиска определяемой, очевидно, как выбранной стратегией, так и размером симплекса. Поскольку в нестационарных условиях параметры поля в плоско-

сти наблюдения изменяются во времени сложным образом, вызывает затруднения выбор какого-либо регулярного способа изменения ребра симплекса по мере приближения к оптимуму. Напомним, что при компенсации стационарной ветровой рефракции [1] достаточно воспользоваться простейшими законами сжатия симплекса (степенным или экспоненциальным), с тем чтобы добиться достижения оптимума фокусировки с любой наперед заданной точностью. Наоборот, при наличии переходных процессов на трассе, сопровождающих поиск оптимальной фазы, представляется разумным сохранять симплекс постоянным.

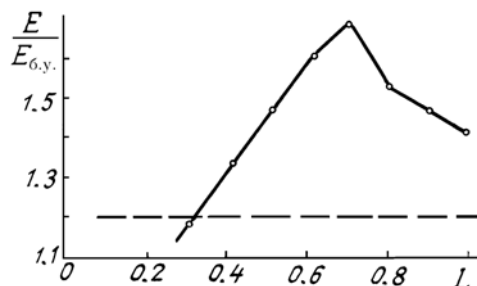


Рис. 2. Суммарная относительная световая энергия  $E/E_{6.у.}$ , попадающая в приемную апертуру за время управления  $T = 3\tau_V$ , в зависимости от длины ребра симплекса  $L$  (штриховая линия – градиентный метод с оптимальным шагом). Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$ .  $E_{6.у.}$  – энергия в системе без управления

В нестационарных условиях имеет смысл рассматривать управление пучком в течение конечного времени  $T$  с момента включения лазерного источника. Поскольку характерное время установления тепловой линзы на трассе составляет  $t_{уст} \cong 3\tau_V$ , в первую очередь представляет интерес рассмотреть управление пучком именно на таких временах. На рис. 2 приведена расчетная зависимость суммарной энергии, попадающей в заданную апертуру за время  $T = 3\tau_V$ , от длины ребра симплекса  $L$ . Для сравнения там же приведено значение, достигаемое при использовании градиентной процедуры с оптимальным шагом [3]. Видно, что эффективности обоих методов – одного порядка при длине ребра симплекса  $L$ , равной 0,3. С ростом  $L$  вплоть до  $L = 0,7$  эффективность симплексного поиска повышается, а затем падает, что связано с ранним развитием осцилляций критерия качества, вызванных вариациями фазы пучка чрезмерно большой амплитуды (рис. 3).

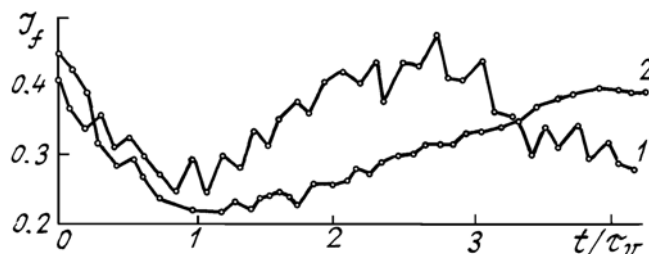


Рис. 3. Динамическое управление фазой пучка на основе симплекс-метода при двух значениях длины ребра симплекса:  $L = 0,6$  (кривая 1) и  $L = 0,3$  (кривая 2). Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$

Более детальные расчеты показывают, что оптимальный размер симплекса  $L_{opt}$  определяется в основном параметром нелинейности и в меньшей степени зависит от времени управления  $T$ . Если  $T$  не превышает  $3\tau_V$ , то  $L_{opt}$  может быть оценено по эмпирической формуле  $L \geq kv$ ,  $k$  – размерность пространства управления,  $v$  – средняя нормированная скорость смещения энергетического центра неуправляемого пучка. При более длительном управлении пучком ( $T > 3\tau_V$  эффективнее оказывается использование симплекса меньшего размера, то есть  $L_{opt} = v$ ).

#### 4. Быстродействие системы и эффективность управления

Выше рассмотрена модель адаптивной системы, имеющая конечное быстродействие, которое определяется временем между последовательными коррекциями волнового фронта  $\tau_c$  (в расчетах полагалось  $\tau_c = 0,1\tau_V$ ). Очевидно, что такая система не способна отследить тепловое расплывание и уход пучка на начальной стадии прогрева среды, то есть на временах управления  $T \cong \tau_V$ . Это связано с тем, что за время  $(k+1)\tau_c$ , требующееся для определения начальной конфигурации симплекса, тепловая линза сильно деформируется и первые рабочие шаги ведут лишь к ухудшению критерия фокусировки. В рамках рассматриваемой модели варьирование быстродействия системы нетрудно осуществить путем изменения  $\tau_c$  при фиксированном времени релаксации среды  $\tau_r$ . В частности, неограни-

ченное уменьшение  $\tau_c$  позволяет перейти к модели идеализированной адаптивной системы с бесконечно большим быстродействием. Одновременно происходящие в реальной системе поиск оптимальной фазы и переходные процессы в среде при этом приблизительно разделяются во времени. Оптимизация фазы для каждого мгновенного состояния среды может быть проведена в «замороженном» тепловом поле с любой наперед заданной точностью. Последующая релаксация среды в течение времени  $\tau$ , позволяет согласовать найденную фазу и нелинейную тепловую линзу.

Расчеты показывают, что управление на времени  $T \cong \tau_V$  является эффективным, если  $\tau_c \leq \frac{1}{2(k+1)} \tau_r$ . Дополнительные возможности повышения концентрации поля на объекте открывает также оптимизация размера симплекса (рис. 4).

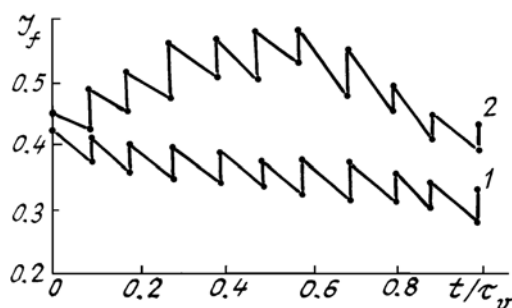


Рис. 4. Управление фазой пучка при «замороженных» мгновенных состояниях среды ( $\tau_c = 0,01\tau_V$ ). Кривая 1 —  $L = 0,1$ , 2 —  $L = 0,2$ . Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$

Анализ модельных задач, выполненный в настоящей статье, позволяет сделать вывод о применимости симплексного поиска оптимальной фазы при динамической компенсации нестационарной ветровой рефракции. В зависимости от длительности  $T$  и быстродействия  $\tau_c$  следует использовать симплекс разного размера, что связано с тем, что для каждого конкретных  $T$  и  $\tau_c$  существует оптимальная амплитуда вариаций фазы пучка, непосредственно связанная с длиной ребра симплекса  $L$ . Априорные оценки  $L_{\text{opt}}$  могут быть выполнены для набора типовых ситуаций на трассе средствами численного эксперимента.

1. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // XI Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах (Тезисы докл.), Томск, 1991. С. 154.
2. Дамбраускас А. П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979.
3. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. С. 590—591.

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
22 ноября 1991 г.

I. V. Malafeeva, I. E. Telpukhovskii, S. S. Chesnokov. **Dynamic Correction of Nonstationary Wind Refraction by means of Simplex Method.**

Study of the simplex method applicability to compensation of long light pulse thermal blooming in regular medium is carried out using numerical simulations. An algorithm allowing one to improve the control efficiency under nonstationary conditions is suggested. The size of a simplex is optimized relative to the nonlinearity parameter, duration of the beam control, and the operation rate of the adaptive system.