

И.В. Малафеева, С.С. Чесноков

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМА СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СВЕТОВОГО ПУЧКА

Статья посвящена развитию симплекс-метода применительно к задачам атмосферной оптики. Основное внимание уделено возможностям повышения быстродействия алгоритма управления за счет уменьшения времени между последовательными коррекциями волнового фронта пучка. Определены условия, при которых быстродействующий алгоритм обеспечивает более эффективную компенсацию нестационарного теплового самовоздействия в случайно-неоднородной среде.

В последние годы в теории адаптивных систем важное место занимает поиск новых алгоритмов управления, имеющих повышенное быстродействие, устойчивых в условиях флуктуаций параметров среды и пучка и т.д. Как показали численные эксперименты [1–4], одним из перспективных методов, расширяющих предельные возможности систем фокусировки излучения в нелинейной среде, является симплексный поиск оптимальной фазы. По ряду параметров он превосходит градиентную процедуру <восхождения на холм> [5, 6], обычно реализуемую в системах апертурного зондирования. Детальный анализ свойств симплекс-метода и учет физических условий распространения пучка в самонаведенном нестационарном поле тепловых возмущений на трассе, по-видимому, позволит в ближайшем будущем синтезировать оптимальный алгоритм управления волновым фронтом, удовлетворяющий современным требованиям к системам атмосферной оптики.

Настоящая статья посвящена исследованию эффективности симплекс-метода в задаче о компенсации теплового самовоздействия светового пучка в случайно-неоднородной среде. Рассмотрена зависимость качества компенсации от быстродействия исполнительных элементов системы формирования фазы. Численное исследование выполнено на основе математической модели распространения пучка в атмосфере, позволяющей одновременно учесть как пульсации скорости ветра, так и крупномасштабные флуктуации показателя преломления [4]. Здесь полагается, что средние времена заморозки пульсаций скорости ветра и каждой реализации поля случайных флуктуаций показателя преломления одинаковы, причем их смена происходит в одни и те же моменты времени. Исследование качества управления проведено в зависимости от параметра $D_s(2a_0)$ [5], характеризующего турбулентность атмосферы на трассе и имеющего смысл структурной функции флуктуаций фазы сферической волны на диаметре пучка (a_0 – начальный радиус пучка).

В соответствии с принципом модального управления будем полагать, что на корректоре формируется волновой фронт в виде суперпозиции базисных мод:

$$U(x, y, t) = \theta_x(t)x + \theta_y(t)y + S_x \frac{x^2}{2} + S_y \frac{y^2}{2}. \quad (1)$$

В рассматриваемой здесь системе апертурного зондирования используется поочередное варьирование управляемых координат (θ, S), при этом быстродействие адаптивной системы определяется временем τ_c между последовательными коррекциями волнового фронта. Переходные процессы, возникающие на трассе при амплитудных и фазовых вариациях поля на входе в среду, приводят к значительным изменениям интенсивности на объекте фокусировки, что оказывает влияние на устойчивость адаптивной коррекции. Процесс установления температуры в канале распространения характеризуется конвективным временем $\tau_v = a_0 / \langle v \rangle$, определяемым радиусом пучка a_0 и средней скоростью ветра на трассе $\langle v \rangle$.

В проведенных ранее исследованиях [2–4] рассматривалась модель адаптивной системы, имеющей конечное быстродействие (а именно, $\tau_c \geq 0,1 \tau_v$). В то же время не представляет труда, неограниченно уменьшая τ_c , перейти к модели идеализированной адаптивной системы с бесконечно большим быстродействием. В этом случае поиск оптимальной фазы и переходные процессы в системе <пучок–среда>, в реальных условиях происходящие одновременно, приближенно разделяются во времени. Поэтому для каждого мгновенного состояния среды оптимизация фазы проводится в <замороженном> тепловом поле, а последующая релаксация среды в течение времени τ_r согласовывает найденную фазу и нелинейную тепловую линзу. На основе численных экспериментов [2] установлено, что вполне удовлетворительная точность расчетов достигается при $\tau_r \cong 0,1 \tau_v$.

Поскольку выбор стратегии поиска и определение оптимального размера симплекса, как показано в [2], играют решающую роль в организации эффективной компенсации теплового самовоздействия в реальном времени, представляет интерес анализ связи этих факторов с быстродействием алгоритмов управления. Для последующих оценок эффективности фазовой коррекции воспользуемся, как и ранее, критерием фокусировки:

$$J_f(t) = \frac{1}{P_0} \int \exp(-r^2/s_f^2) I(\mathbf{r}, z_0, t) d^2\mathbf{r}, \quad (2)$$

характеризующим локализацию светового поля в пределах заданной апертуры с радиусом s_f (P_0 – полная мощность в пучке, I – интенсивность световой волны, $\mathbf{r} = \{x, y\}$ – радиус-вектор в плоскости $z = \text{const}$, z_0 – длина трассы).

Воспользуемся в качестве базового алгоритма симплексным поиском со свободным отражением вершин [7], позволяющим успешно проводить оптимизацию фазы для каждого мгновенного состояния среды и отслеживать временной уход критерия фокусировки в процессе последующей релаксации тепловой линзы. Основное правило данного алгоритма состоит в отражении наихудших вершин симплекса без каких-либо дополнительных условий.

При выборе оптимального размера симплекса необходимо учесть, что его величина связана с предельным быстродействием адаптивной системы. Простые оценки показывают, что для определения оптимальной фазы необходимо проделать по крайней мере $n_{\text{opt}} = 2(k+1)$ итерационных шагов, где k – размерность модального базиса (в рассматриваемом здесь случае $k = 4$). В самом деле, первые $k+1$ измерений целевой функции требуются для определения начальной конфигурации симплекса и еще примерно столько же ее измерений нужно для надежного восхождения на <замороженный холм>. Результаты численных экспериментов, подтверждающих эти рассуждения, представлены на рис. 1, где помещены динамические зависимости критерия фокусировки при управлении в базисе (1) для двух значений числа оптимизационных шагов за время заморозки: $n_{\text{opt}} = 5$ (кривая 1) и $n_{\text{opt}} = 10$ (кривая 2).

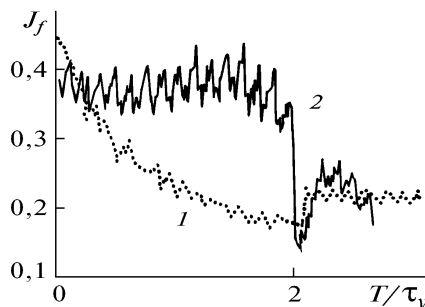


Рис. 1. Зависимость критерия фокусировки J_f от длительности управления T при динамической компенсации теплового самовоздействия на основе симплекс-метода. Кривые: 1 – $n_{\text{opt}} = 5$, 2 – $n_{\text{opt}} = 10$. Условия распространения: длина трассы $z_0 = 0,5$, параметр нелинейности $\langle R \rangle = -20$; дисперсия флуктуаций скорости ветра $\sigma_v = 0,3$; параметр $D_s(2 a_0) \approx 1$

Учитывая, что в реальных условиях оптимизация фазы пучка и релаксация среды неразделимы во времени, для практических оценок требуемого быстродействия системы управления можно

воспользоваться неравенством:

$$\tau_c \leq \tau_v / 20 (k + 1) . \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, быстродействующий алгоритм со свободным отражением вершин обеспечивает эффективную коррекцию нестационарного теплового самовоздействия лишь на конечном временном интервале, после чего происходит <срыв> управления, принципиально неустранимый подбором размера симплекса. Причина этого явления становится понятна из анализа рис. 2, на котором проведено сравнение алгоритмов большого ($\tau_c = 0,01 \tau_v$) и среднего ($\tau_c = 0,1 \tau_v$) быстродействия.

В частности, из рис. 2 видно, что второй алгоритм устойчив на больших временах управления, хотя на коротких ($\approx 2 \tau_v$) временах проигрывает первому по эффективности. Это происходит из-за более плавного, чем в первом случае, изменения управляемых координат S_x, S_y (рис. 3). Именно чрезмерно большая скорость нарастания кривизны волнового фронта при оптимизации фазы по замороженным состояниям среды и приводит к ранней (при $t \approx 2 \tau_v$) перефокусировке пучка. Указанный эффект можно частично ослабить, уменьшая размер симплекса, однако при этом ухудшается эффективность управления на начальной стадии прогрева среды (при $t \approx \tau_v$), поскольку симплекс малого размера <не успевает> отследить ветровой уход целевой функции.

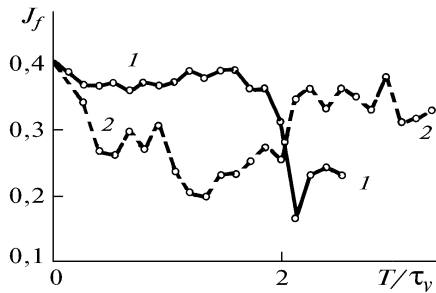


Рис. 2. Зависимость критерия фокусировки J_f от длительности управления T для двух случаев. Кривые: 1 – $\tau_c = 0,01 \tau_v$, 2 – $\tau_c = 0,1 \tau_v$.

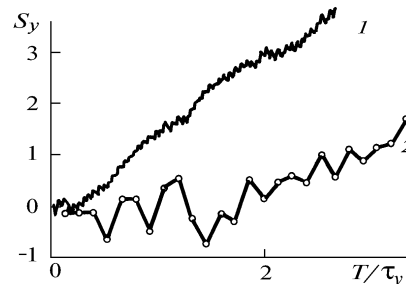


Рис. 3. Динамика управляемой координаты S_y в процессе оптимизации критерия J_f на основе симплекс-метода. Условия распространения: длина трассы $z_0 = 0,5$, параметр нелинейности $\langle R \rangle = -20$; дисперсия флуктуаций скорости ветра $\sigma_v = 0,3$; параметр $D_s(2 a_0) \approx 1$.

Второй, более предпочтительный способ устранения перефокусировки пучка состоит в введении ограничений на значения управляемых координат. Величина этих ограничений может быть оценена, например, из анализа динамики переменных $S_x(t), S_y(t)$ при компенсации теплового самовоздействия системой со средним быстродействием ($\tau_c = 0,1 \tau_v$). В итоге можно представить себе процесс управления как движение симплекса в некотором <коридоре> с жесткими стенками, при достижении которых прекращается нарастание соответствующих координат, но возможно их уменьшение. На рис. 4 и 5 представлены соответственно типовые временные зависимости критерия фокусировки и переменных S_x, S_y при управлении пучком с помощью быстродействующего алгоритма ($\tau_c = 0,01 \tau_v$) с ограничением предельных значений кривизны волнового фронта, которые отмечены штрихпунктиром.

Для сравнения на рис. 4 приведены аналогичные зависимости в случае управления со средним быстродействием ($\tau_c = 0,1 \tau_v$) и при отсутствии управления (для коллимированного пучка). Видно, что введение ограничений на перемещение симплекса в пространстве управляемых координат действительно позволяет добиться устойчивой компенсации теплового расплывания пучка на протяжении достаточно длительного интервала времени ($T \approx 10 \tau_v$). Усреднение по 10 реализациям показало, что использование предлагаемого алгоритма повышает суммарную световую энергию, попадающую в приемную апертуру за время управления, в 1,3 раза по сравнению с компенсацией системой со средним быстродействием и в 1,7 раз по сравнению с отсутствием управления.

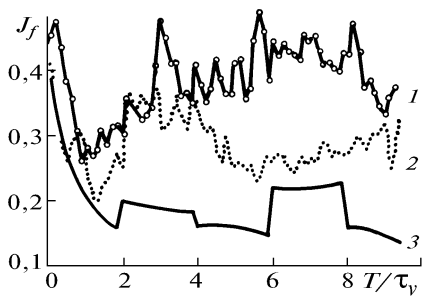


Рис. 4. Типовые временные зависимости критерия фокусировки. Кривые: 1 – управление при наличии ограничений на управляемые координаты ($\tau_c = 0,01 \tau_v$), 2 – управление при $\tau_c = 0,1 \tau_v$, 3 – отсутствие управления (коллимированный пучок)

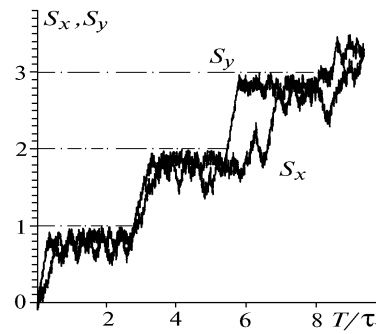


Рис. 5. Характерная зависимость управляемых координат S_x, S_y от времени при наличии ограничений в алгоритме с повышенным быстродействием ($\tau_c = 0,01 \tau_v$). Условия распространения: длина трассы $z_0 = 0,5$, параметр нелинейности $\langle R \rangle = -20$; дисперсия флуктуаций скорости ветра $\sigma_v = 0,3$; параметр $D_s(2 a_0) \approx 2$

В заключение отметим, что проведенные в статье оценки быстродействия алгоритма управления и оптимального размера симплекса, при которых обеспечивается надежная компенсация нестационарных искажений светового пучка, могут быть легко переформулированы в виде технических требований к исполнительным элементам адаптивной системы. В частности, оптимальный размер симплекса $L_{opt} \approx 0,2$ соответствует при $k = 4$ изменению кривизны зеркала на одном итерационном шаге $\Delta S \approx 0,05 (k a_0^2)^{-1}$, что, в свою очередь, эквивалентно смещению зеркала радиусом $R = 10 a_0$ на величину порядка $0,1\lambda$. Для определения частотных характеристик зеркала необходимо учесть, что скачкообразные изменения управляемых координат оказывают на него ударные воздействия, вызывающие длительные колебательные процессы [8], которые сильно усложняют поиск оптимальной фазы.

Очевидно, что переходные процессы в зеркале окажутся не столь существенными, если от мгновенных изменений управляемых координат перейти к более плавным, например, линейно меняющимся во времени с характерной длительностью τ_R , определяемой добротностью механической системы Q . В частности, для биморфных пьезоэлектрических зеркал с $Q \approx 10$ достаточно положить τ_R равным периоду основного тона свободных колебаний. В итоге оценка для резонансной частоты зеркала имеет вид $f \geq 100/\tau_v$.

Работа выполнена при поддержке Международного лазерного центра МГУ.

1. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. С. 1249.
2. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. С. 413–417.
3. Малафеева И. В., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. С. 1150–1153.
4. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. С. 1252–1257.
5. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
6. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
7. Дамбраускас А. П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979. 168 с.
8. Безуглов Д. А., Мищенко Е. Н. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. С. 1325.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
22 сентября 1993 г.

I. V. Malafeeva, S. S. Chesnokov. **Influence of the Simplex Search Algorithm Speed of Response on the Efficiency of an Adaptive Compensation for Distortions of a Light Beam.**

In this paper we propose a further development of a simplex search method as applied to atmospheric optics problems. We pay the main attention to looking for a possibility of increasing the speed of response of the control algorithm by shortening time gaps between successive corrections of the wave front of a beam. We also have determined conditions under which a fast algorithm provides for more efficient compensation for nonstationary thermal blooming in a randomly inhomogeneous medium.