

И.В. Малафеева, С.С. Чесноков

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ВЕТРОВОЙ РЕФРАКЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БАЗИСА УПРАВЛЕНИЯ**

Средствами численного моделирования проведена оптимизация базиса управления фазой светового пучка, распространяющегося в движущейся регулярной среде. Рассмотрена возможность уменьшения числа управляемых координат, основанная на анализе тепловых искажений пучка и свойствах симплексного поиска. Показано, что адаптивная коррекция в оптимальном базисе достаточно эффективна в широком диапазоне параметра нелинейности.

В нестационарных условиях одним из основных факторов, определяющих эффективность компенсации теплового самовоздействия в реальном времени, является быстродействие адаптивной системы. По-видимому, наиболее простой способ повышения быстродействия, не связанный с аппаратным усложнением системы компенсации, состоит в оптимизации базиса управления волновым фронтом пучка. Теоретический анализ [1–5] показывает, что в режиме стационарной ветровой рефракции зависимость качества коррекции от числа используемых в управлении мод волнового фронта пучка носит монотонный характер. При распространении пучка на длинных трассах основной вклад в улучшение энергетических характеристик пучка на объекте дают моды первого и второго порядка (наклон, дефокусировка и астигматизм), причем относительный вес этих мод в оптимизированном волновом фронте примерно одинаков. В динамическом режиме, когда на величину и местоположение максимума целевой функции в пространстве координат управления существенно влияет траектория поиска, зависимость качества коррекции от используемых мод становится более сложной. Вследствие этого оптимизация базиса в условиях нестационарной ветровой рефракции должна проводиться иначе, чем в стационарном режиме, и может привести к другим результатам.

В частности, вместо широко используемого в квазистационарных задачах критерия фокусировки [6], характеризующего мгновенную концентрацию светового поля на объекте, в рассматриваемом режиме более целесообразно использовать суммарную световую энергию  $W$ , попадающую на объект в течение заданного промежутка времени. Поскольку управление фазой происходит одновременно с формированием «тепловой линзы» на трассе, неудачные коррекции, проведенные на начальной стадии управления, зачастую вызывают снижение критерия  $W$ , неустранимое последующими, даже удачными коррекциями. Наоборот, разумный выбор базиса управления дает возможность целенаправленно влиять на формируемую тепловую линзу, используя ее свойства для улучшения условий распространения пучка.

Сравнительный анализ алгоритмов компенсации тепловой дефокусировки на основе апертурного зондирования [7, 8] показал, что наиболее эффективным в стационарных задачах является симплекс-метод, обеспечивающий наибольшую скорость сходимости итерационного процесса оптимизации фазы. В режиме нестационарной ветровой рефракции установлено [9], что скачкообразное изменение управляемых координат, характерное для симплекс-метода, приводит к принудительному сканированию пучка, улучшающему условия его распространения. В связи с этим представляется целесообразным проводить оптимизацию базиса управления на основе именно симплекс-метода.

Распространение светового пучка в движущейся регулярной среде описывается системой безразмерных уравнений, в которых будем использовать стандартные обозначения и нормировку [6]:

$$2i\partial E/\partial z = \Delta_{\perp} E + RTE; \quad (1)$$

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

Комплексная амплитуда светового поля на входе в среду ( $z = 0$ ) задается в виде

$$E(x, y, 0, t) = E_0 \exp(iU(x, y, t)), \quad (3)$$

где управляемый волновой фронт  $U(x, y, t)$  представляет собой комбинацию базисных мод. В соответствии со структурой фазовых искажений пучка в условиях тепловой дефокусировки на длинной трассе  $U$  естественно выбрать в виде

$$U(x, y, t) = \vartheta(t)x + S_x(t)x^2/2 + S_y(t)y^2/2. \quad (4)$$

На рис. 1 представлена типичная динамика критерия фокусировки  $J_f(t)$  при управлении фазой пучка в базисе (4) на основе симплекс-метода с оптимальным шагом [9]. Соответствующие зависимости управляемых координат  $\vartheta$ ,  $S_x$ ,  $S_y$  от времени изображены на рис. 2.

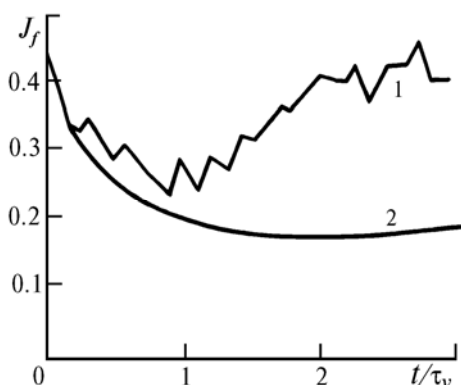


Рис. 1. Динамическое управление фазой пучка на основе симплекс-метода с оптимальным шагом (кривая 1). Поведение критерия фокусировки  $J_f(t)$  без управления (кривая 2). Условия распространения;  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$

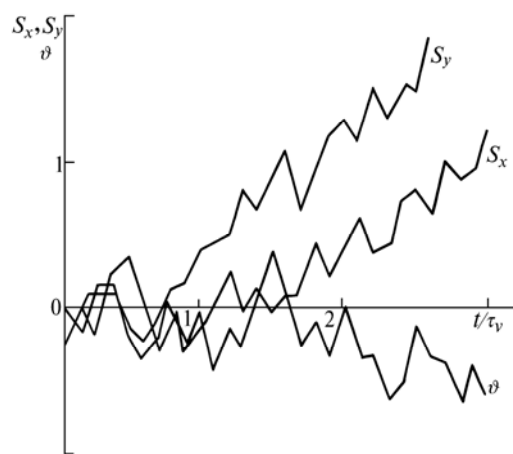


Рис. 2. Кривые изменения управляемых координат в процессе оптимизации критерия  $J_f$  на основе симплекс-метода с оптимальным шагом. Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$

Из последнего рисунка видно, что в процессе динамической коррекции фазы переменные  $S_x$ ,  $S_y$  оказываются в каждый момент времени пропорциональными друг другу. В соответствии с этим представляется естественным попытаться уменьшить число независимых переменных в симплексном поиске, введя комбинированную моду ( $x^2/4 + y^2/2$ ), т.е. задав волновой фронт в виде

$$U = \vartheta x + S(x^2/4 + y^2/2). \quad (5)$$

Расчеты показывают, что в этом случае пучок лучше фокусируется и, несмотря на сканирование, смещается от оси первоначального распространения незначительно (рис. 3). Важно отметить, что, как следует из теории метода, оптимальный размер ребра симплекса зависит от размерности пространства управлений, возрастая с ее увеличением. Поскольку изменения управляемых переменных в процессе поиска пропорциональны длине ребра симплекса, двумерное управление в базисе (5) оказывается более «плавным», чем трехмерное в базисе (4).

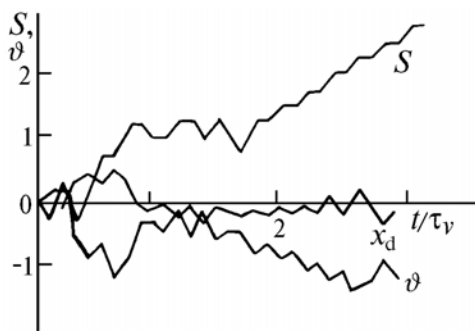


Рис. 3. Изменения управляемых координат  $S$ ,  $\vartheta$  и смещения энергетического центра пучка  $x_c$  при двумерном управлении с применением комбинированной моды. Условия распространения:  $z_0 = 0,5$ ,  $R = -20$

Другой способ уменьшения числа независимых переменных можно предложить на основе анализа фазовых искажений пучка в режиме ветровой рефракции. Учитывая, что тепловая «линза» на трассе обладает фокусирующим действием в плоскости, перпендикулярной скорости среды, естественно зафиксировать  $S_x$ , положив, например,  $S_x = 0$ , т.е. управлять наклоном и цилиндрической фокусировкой в перпендикулярном движению среды направлении; тогда

$$U = \vartheta x + S_y y^2/2. \quad (6)$$

Можно также предположить, что в ряде случаев достаточно эффективным окажется управление только по наклону волнового фронта при  $S_x$ ,  $S_y = 0$ , т.е.

$$U = \theta x. \quad (7)$$

Итоговые результаты по моделированию рассмотренных алгоритмов в широком диапазоне значений параметра нелинейности  $R$  приведены на рис. 4,  $a$ ,  $b$ , где эффективность коррекции оценивается по суммарной световой энергии  $W$ , попадающей в приемную апертуру за время управления  $T = 3\tau_v$ , по отношению к ой же энергии без управления  $W_0$ .

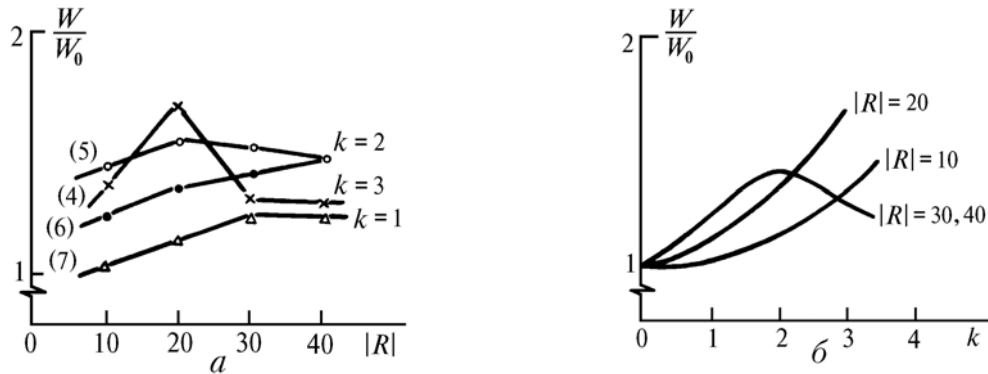


Рис. 4. Зависимость эффективности коррекции за время управления  $T = 3\tau_v$  от:  $a$  — параметра нелинейности  $R$ ;  $b$  — числа управляемых координат  $k$ . В скобках даны номера формул, описывающих используемые базисы

Из рисунка видно, что в зависимости от нелинейности среды (мощности излучения) наиболее эффективным оказывается управление в разных базисах. В частности, при  $|R| \leq 20$  предпочтительнее использовать трехмерный базис (4), а при больших нелинейностях — двумерные базисы (5) или (6). В широком диапазоне параметра нелинейности  $0 \leq |R| \leq 40$  применение комбинированной моды (базис (5)) обладает преимуществами по сравнению с использованием одной фокусировки в поперечном движении среды направлении (базис (6)). Управление только по наклону волнового фронта (7) при всех  $|R|$  наименее эффективно. В целом можно утверждать, что при двумерном управлении в базисе (5), по-видимому, наиболее удачно совмещаются физические особенности рассматриваемой задачи и свойства симплексного поиска.

1. Nahrstedt D. A. // Appl. Optics. 1983. V. 2. № 2. P. 244–252.
2. Чесноков С. С. // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1986. Т. 50. № 4. С. 796–798.
3. Чесноков С. С., Шленов С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 7. С. 847–855.
4. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 9. С. 983–986.
5. Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Там же. № 12. С. 1290–1293.
6. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.
7. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // II Всесоюз. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах. (Тезисы докл.). Томск. 1991. С. 154.
8. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 12. С. 1249–1253.
9. Малафеева И. В., Тельпуховский И. Е., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. № 4. С. 413–417.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
5 мая 1992 г.

I. V. Malafeeva, S. S. Chesnokov. Efficiency of the Adaptive Correction for Nonstationary Wind-Induced Refraction as a Function of the Control Basis.

The basis of a phase control of a light beam propagating in moving regular medium is optimized using numerical simulations. A possibility of reducing the number of coordinates under control is considered. It is based on the analysis of the beam thermal distortions and on the properties of the simplex method. It is shown that an adaptive correction on an optimized basis is quite efficient in a wide range of the nonlinearity parameter.