«Оптика атмосферы», **3**, № 1 (1990)

УДК 621.378.325

В.А. Трофимов

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ СВЕТОВОГО ПУЧКА В АЛГОРИТМЕ АПЕРТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. Ч. I. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

Рассматриваются способы увеличения быстродействия адаптивного управления волновым фронтом светового пучка. Получены оптимальные законы изменения констант управления в зависимости от расстояния до приемника, начальной мощности пучка, отстройки оптимизируемых параметров от их экстремальных значений.

В последние годы интенсивно исследуется проблема компенсации амплитудно-фазовых искажений световых пучков [1 —13]. В публикациях, относящихся к этой проблеме, в частности, рассматривается влияние различных факторов на качество компенсации: таких, например, как нелинейность процесса распространения светового пучка, турбулентность среды, параметры приемника. Одной из основных характеристик адаптивной системы, которая определяет качество компенсации, является ее быстродействие. Очевидно, если время достижения оптимальных параметров светового пучка будет превышать характерное время изменения состояния среды и приемника, то адаптивное управление будет неэффективным. Поэтому необходимо организовывать управление по алгоритмам, имеющим максимальное быстродействие.

В первой части статьи основное внимание уделено построению алгоритмов с выбором оптимальных констант управления при настройке адаптивной системы по градиентному методу. Во второй ее части (см. с. 74—78 наст, журнала) рассматриваются вопросы практической реализации предложенных законов изменения констант, некоторые другие (отличные от градиентного метода) алгоритмы, а также вопросы повышения быстродействия в многоканальных системах.

Как известно, быстродействие адаптивного управления можно повысить несколькими способами: во-первых, за счет уменьшения числа оптимизируемых параметров; во-вторых, за счет выбора их хорошего начального приближения, близкого к оптимальным значениям; в-третьих, за счет построения «быстрых» алгоритмов управления, т. е. обладающих максимальным быстродействием. Очевидно, более универсальным является последний способ. Он включает в себя совершенствование широко используемого в литературе алгоритма, основанного на градиентном методе, и разработку новых алгоритмов, отличных от градиентного метода и более эффективных, чем он.

Заметим, что приращения оптимизируемых параметров на очередном шаге управления определяются расстоянием до приемника, его параметрами(размером, коэффициентом отражения), характеристиками пучка (мощностью, радиусом и т.д.), а также геометрией адаптивного зеркала (расположением управляющих элементов, приводов). Поэтому построение «быстрого» алгоритма целесообразно проводить в два этапа. Так, разработка новых алгоритмов или улучшение градиентного метода должны быть направлены на устранение зависимости сходимости и быстродействия итерационного процесса отработки оптимальных параметров от начальной мощности оптического излучения, от расстояния до приемника, от его размера и коэффициента отражения, т.е. от параметров, не зависящих от адаптивного зеркала (активного элемента системы). Это составляет первый этап. На втором этапе следует учесть зависимость быстродействия от геометрии расположения управляющих элементов (каналов управления). Таким образом, в предлагаемом подходе константы управления представляются в виде произведения двух функций, одна из которых зависит от параметров пучка (мощности и т.д.), среды, приемника, а вторая зависит от положения приводов (геометрии зеркала). В этой части статьи остановимся на построении оптимальных с точки зрения быстродействия алгоритмов управления, не принимая во внимание геометрию активного элемента (зеркала).

В общем случае [11] управление вектором оптимизируемых параметров светового пучка в алгоритме апертурного зондирования осуществляется по закону

$$D\Theta(t) = -\hat{\gamma}\,\frac{\partial\Phi\left(J\left(\Theta(t-\tau_{зк}),\ L(t-\tau_{зс}),\ \alpha(t-\tau_{зс})\right)\right)}{\partial\Theta(t-\tau_{зк})}, \tag{1}$$

где D — оператор, определяемый функцией отклика адаптивной системы; t — безразмерное время; $\hat{\gamma}$ — матрица констант управления; J — выбранный для оценки качества компенсации искажений функционал, например функционал принимаемой на мишени мощности; Φ — функция от функционала J, выбор которой определяет алгоритм управления, в частности при использовании градиентного метода $\Phi = J$; L — расстояние до перемещающегося приемника, измеряемое в единицах дифракционной длины $l_д = \kappa a^2/2$, здесь κ — волновое число; a — начальный радиус пучка; α характеризует превышение начальной мощности пучка над мощностью самовоздействия. Отмечу, что в большинстве работ рассматривается двухточечный алгоритм, для которого $D\Theta(t) = \Theta(t + \tau) - \Theta(t) = \Theta_{N+1} - \Theta_N$, где τ — время выработки управляющего сигнала. В (1) учтено запаздывание $\tau_{зс}$, $\tau_{зк}$ соответственно в поступлении информации о приемнике и среде, а также об изменении критерия качества. Следует подчеркнуть, что некоторые вопросы управления фокусировкой пучка в регулярных нелинейных средах при наличии запаздывания и инерционности рассмотрены в [12, 14], а компенсация фазовых флуктуаций — в [8], где для повышения качества компенсации предлагается использовать экстраполяцию (прогнозирование) состояния среды. Однако известно [15], что ошибки экстраполяции быстро увеличиваются с ростом интервала времени прогнозирования. Поэтому повышение быстродействия адаптивной системы (уменьшение интервала прогнозирования) является необходимым для достижения эффективной коррекции искажений светового пучка. В [16] на основе развитых упрощенных моделей для случая неподвижной среды предложены законы изменения константы управления фокусировкой волнового фронта пучка, позволившие достичь в численных экспериментах максимального быстродействия при оптимизации с помощью градиентного метода его волнового фронта. Ниже приводится методика выбора констант управления для отличных от [16] случаев компенсации нелинейных искажений и математическое обоснование полученных в [16] законов изменения констант управления. Рассмотрение базируется на теории итерационных методов [17].

Для наглядности рассмотрим сначала процесс фокусировки Θ светового пучка на неподвижный приемник ($L(t) = L = \mathrm{const}$), расположенный в среде с керровской нелинейностью, адаптивной системой без запаздывания ($\tau_{зк} = \tau_{зс} = 0$) при ее настройке по критерию ($J = J_а$) минимума ширины пучка на приемнике. Используя безаберрационное описание распространения светового пучка, нетрудно вычислить его ширину в сечении приемника и получить из (1) при оптимизации Θ по градиентному методу ($\Phi = J$) следующий закон пошагового изменения фокусировки [18]:

$$\Theta_{N+1} = \Theta_N + 2\gamma_{\gamma+1} L\,(1 - L\Theta_N),\ N = 0,\ 1,\ 2, \ldots, \tag{2}$$

или

$$\frac{\Theta_{N+1} - \Theta_N}{\gamma_{N+1}} + A\Theta_N = 2L,\ A = 2L^2,\ N = 0, 1, \ldots, \tag{2'}$$

где γ_{N+1} — константа управления (в случае прохождения пучком слоя неподвижной среды с тепловым механизмом нелинейности в (2) нужно Θ заменить на $\Theta - \Theta_{нл}$, здесь $\Theta_{нл}$ — дополнительная расходимость пучка, внесенная слоем). Отметим, что (2′) соответствует канонической форме записи двухслойных итерационных схем [17], для которых разработаны методы выбора оптимальных параметров γ_{N+1}, реализующих максимальную скорость сходимости итерационных методов (в нашем случае — достижение оптимальной фокусировки $\Theta_{опт} = 1/L$). Введя отстройку фокусировки пучка от ее оптимального значения $\xi_N = \Theta_N - 1/L$, из (2′) получим

$$(\xi_{N+1} - \xi_N)/\gamma_{N+1} + A\xi_N = 0. \tag{3}$$

Выбирая параметр γ_{N+1} из условия минимума ξ^2_{N+1},, определим его оптимальное значение, при котором реализуется максимальное быстродействие

$$(\gamma_{N+1})_{опт} = 1/2L^2. \tag{4}$$

Метод, использующий данный способ определения γ_{N+1} называется методом минимальных невязок. Важно подчеркнуть, что оптимальное значение константы управления, определенное непосредственно из решения разностного уравнения (2), совпадает со значением $\gamma_{опт}$ в (4).

Оптимальное значение константы управления может быть также определено из условия ортогональности ξ_{N+1} к ξ_N (это метод скорейшего спуска). Существенно, что (4) справедливо для перемещающихся приемников. В этом случае L становится функцией итерации $L \to L_N$ и при оптимальном γ_{N+1} реализуется квазистатическое управление фокусировкой $\Theta_{N+1} = 1/L_N$ (см. также [16]). Следовательно, текущее значение фокусировки определяется предыдущим положением приемника. Если скорость перемещения приемника или быстродействие адаптивной системы таково, что приемник успевает выйти из области продольного фокуса пучка, то качество фокусировки будет низким. В этом случае после достижения максимального быстродействия необходимо использовать экстраполяцию [16] положения приемника (по терминологии из [8] — «прогнозирование»).

Для практики оказывается более важным управление по критерию пиковой интенсивности $J = J_m$ на приемнике. Тогда вместо (2) из (1) получим [18]

$$\Theta_{N+1} = \Theta_N + \frac{2\gamma L\,(1 - L\Theta_N)}{[(1 - L\Theta_N)^2 + L^2\,(1+\alpha)]^2}\,, \tag{5$'$}$$

или, переписав в канонической форме,

$$B_N\,\frac{\Theta_{N+1} - \Theta_N}{\gamma_{N+1}} + \Theta_N = 1/L,\ B_N = [(1 - L\Theta_N)^2 + L^2\,(1+\alpha)]^2/2L. \tag{5$''$}$$

Заметим, что по классификации, имеющейся в теории итерационных методов [17], (5″) представляет собой нестационарный неявный одношаговый итерационный процесс, что усложняет построение оптимальных алгоритмов. Существенно, что как A, так и B_N строго больше 0, поэтому записи алгоритма в виде (5″) или в виде (2′) эквивалентны. Из (5″) по методу поправок [17] следует оптимальный закон изменения константы управления при изменении положения приемника, мощности пучка и его фокусировки:

$$\gamma_{N+1} = \gamma_0\,[(1 - L\Theta_N)^2 + L^2\,(1+\alpha)]^2/2L^2 \tag{6}$$

(где γ_0 — начальное значение константы управления), что полностью совпадает с полученным в [16] выражением.

Таким образом, полученные в [16] законы изменения константы управления фокусировкой являются оптимальными и неулучшаемыми при использовании алгоритма фокусировки по градиентному методу. Они позволяют в этом случае достичь максимального быстродействия. Важно также подчеркнуть, что (6) справедливо при нестационарном тепловом самовоздействии оптического излучения в неподвижной среде, только вместо α нужно записать $\int\limits_0^{t_N}\alpha(t)dt$.

Используемый выше метод выбора оптимальных значений констант управления дает схему построения $\gamma_{\text{опт}}$ при других условиях на трассе распространения. В качестве примера рассмотрим случай компенсации бокового смещения центра тяжести пучка, прошедшего слой движущейся среды с тепловым механизмом нелинейности. Анализ управления фокусировкой и наклоном волнового фронта для покоящегося и перемещающегося приемников выполнен соответственно в [16] и [19]. Ниже запишем оптимальные законы изменения $\gamma_{N+1}^{(x)}$.

Согласно [19] управление наклоном $\Theta_N^{(x)}$ волнового фронта пучка (с целью коррекции его бокового смещения при настройке адаптивной системы по положению центра тяжести пучка относительно центра приемной апертуры $J_{\text{ц}}$, по интенсивности пучка в центре мишени J_m, по доле принимаемой в апертуру радиусом R мощности J_p) осуществляется по законам

$$\xi_{N+1} = \xi_N - 2\gamma_{N+1}^{(x)}L^2 \begin{cases} \xi_N, & J_{\text{ц}}; \\ \dfrac{\xi_N}{f_N^3}\,e^{-\left(\frac{L\xi_N}{f_N}\right)^2}, & J_m; \\ e^{-\frac{R^2 + L^2\xi_N^2}{f_N^2}}\,\mathrm{sh}\left\{\dfrac{2RL\xi_N}{f_N^2}\right\}\dfrac{1}{Lf_N}\,, & I_p, \end{cases} \tag{7}$$

где $f_N^2 = L^2 + (1 - L(\Theta_N - \Theta_{\text{нл}}))^2$ — квадрат безразмерной ширины пучка в сечении приемника, расположенного на расстоянии L за слоем нелинейной среды; Θ_α — дополнительный наклон волнового фронта, приобретенный пучком в этом слое; $\xi_N = \Theta_T^{(x)} - \Theta_\alpha$. Заметим, что радиус R приемной апертуры нормирован на a, и при записи (7) предполагается, что направление движения среды совпадает с осью X. Переписывая (7) в виде (5″) и применяя метод поправок, получим следующие законы изменения констант управления:

$$\gamma_{N+1}^{(x)} = \frac{\gamma_0^{(x)}f_N^3}{2L^2}\exp\left\{\left(\frac{L\,(\Theta_N^{(x)} - \Theta_\alpha)}{f_N}\right)^2\right\} \tag{8$'$}$$

— при оценке качества коррекции положения центра пучка по критерию J_m;

$$\gamma_{N+1}^{(x)} = \frac{\gamma_0^{(x)} f_N^3}{4RL^2} \mathrm{e} \frac{R^2 + L^2 \xi_N^2}{f_N^2} (\mathrm{sh}\, \eta/\eta), \; \eta = \frac{2RL\xi_N}{f_N^2} \tag{8''}$$

при оценке качества коррекции по критерию J_p, $\gamma_0^{(x)}$ — начальное значение константы управления.

Как видно из (8′, 8″), оптимальное изменение константы управления при компенсации дополнительного наклона волнового фронта экспоненциально зависит от ширины пучка. В то же время, если оптимизация фокусировки происходит с целью достижения максимальной интенсивности на приемнике (без конкретизации точки ее достижения), то алгоритм управления для Θ не будет зависеть от значения наклона волнового фронта (смещения центра пучка), если, конечно, пучок находится в пределах приемника. Поэтому целесообразно сначала оптимизировать $\Theta^{(x)}$.При оценке же оптимизации фокусировки по значению интенсивности на оси пучка процессы адаптации Θ и $\Theta^{(x)}$ связаны одной и той же экспоненциальной зависимостью.

Подчеркнем, что в (8′, 8″) входят характеристики пучка и среды. В тонком нелинейном слое дополнительный наклон волнового фронта можно точно оценить. При расположении же приемника в толще нелинейной среды такая оценка будет весьма грубой. Поэтому на практике уравнения (8′) и (8″) при компенсации смещения центра пучка в толстом нелинейном слое следует изменить, опустив из экспоненты слагаемое Θ_α. При этом начальное значение константы управления должно быть значительно увеличено (примерно в $\exp\{L^2\Theta_\alpha^2\}$ раз). Заметим, что $L\Theta_\alpha$ — значение смещения центра пучка по оси x из-за действия нелинейного слоя. Поэтому при расположении приемника в толще нелинейной среды $\gamma_0^{(x)}$ необходимо увеличить в $\exp\{x_{\text{ц}}^2\}$ раз, где $x_{\text{ц}}$ — координата центра первоначально коллимированного пучка в сечении приемника. Так как в общем случае оно заранее неизвестно, то выбрать требуемое для максимальной скорости сходимости итерационного процесса $\gamma^{(x)}$ вообще говоря, нельзя. Однако минимальное смещение центра пучка нетрудно оценить, используя геометрооптическое приближение распространения пучка прямоугольной формы [20], так как в классе пучков одинаковой мощности, не имеющих в начальном распределении провала интенсивности на его оси, минимальное смещение центра пучка в движущейся среде с тепловым механизмом нелинейности испытывает гипергауссов пучок, профиль которого близок к однородному [21]. Аналогичным свойством обладают гипертрубчатые пучки [22]. С учетом вышесказанного вместо (8′) получим следующее выражение:

$$\gamma_{N+1}^{(x)} = \frac{\gamma_0^{(x)} f_N^3}{2L^2} \exp\left(-\left(L\Theta_N^{(x)}/f_N\right)^2\right),$$

которое справедливо и для перемещающихся приемников. Для (8″) можно записать аналогичное выражение.

Напомним, что выше рассматривался случай фокусировки пучка по оси x. В случае же управления фокусировкой по оси y в (8′, 8″) появится еще предэкспоненциальный множитель — безразмерная ширина пучка по оси y. Следовательно, константа в канале управления наклоном волнового фронта будет зависеть от текущего значения фокусировки пучка по оси y. Остальные рассуждения и выводы остаются в силе.

Таким образом, построены оптимальные законы изменения констант управления с целью достижения максимального быстродействия адаптивной системы при управлении по низшим модам волнового фронта. Предложенный подход применим для любого числа оптимизируемых параметров, в частности для гибких зеркал со многими степенями свободы.

1. Харди Дж.У. //ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31.
2. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1978. Т. 42. № 12. С. 2547.
3. Адаптивная оптика /Пер. с англ. под ред. Э.А. Витриченко. М.: Мир, 1980. 454 с.
4. Ахманов С.А. и др. //Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1—37.
5. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
6. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1986. 134 с.
7. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
8. Атмосферная адаптивная оптика: Тематический выпуск //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1985. Т. 28. № 11. С. 3.
9. Бакут П.А., Киракосянц В.Е., Логинов В.А.//Материалы VIII Всесоюз симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. Ч. 3. С. 55.
10. Чесноков С.С. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1986. Т. 50. № 4. С. 796.
11. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Материалы VIII Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. Ч. 2. С. 3.
12. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1982. Т. 46. № 10. С. 1933.
13. Трофимов В.А. //Автометрия. 1987. № 2. С. 29.

14. Трофимов В.А. //Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 59. Вып. 5. С. 1153.
15. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987. 271 с.
16. Сухоруков А.П., Трофимов В.А.Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 8. С. 1617.
17. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 640 с.
18. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1984. Т. 48. № 7. С. 1424.
19. Кожевникова И.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1985. № 2. С. 13.
20. Трофимов В.А. //Вестник МГУ. Сер. Физика и астрономия 1980. Т. 24. № 2. С. 70.
21. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 10. С. 1292.
22. Трофимов В.А. //Там же. 1985. Т. 28. № 5. С. 643.

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
3 декабря 1988 г.

V.A. Trofimov. **Increased Speed of Adaptive Control of Light Beam Wave Front in Multidither Algorithm. Part I. Construction of Algorithm**.

The ways of increasing the speed of the adaptive control of the light beam wave front are examined. Optimal rules of the control constant variations as a function of the range from the receiver, initial beam power, optimized parameter deviations from their extreme values are derived.