«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. II. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ

Рассматриваются способы практической реализации полученных в первой части работы оптимальных законов изменения констант управления. Обсуждается возможность организации управления волновым фронтом пучка без использования градиентных методов. Предложены законы изменения констант управления в многоканальных адаптивных системах.

1. *Рассмотрим практические способы реализации предложенных в первой части статьи оптимальных законов изменения констант управления, а также некоторые отличные от градиентного метода алгоритмы управления.* Нетрудно видеть, что при оценке качества компенсации нелинейных искажений по функционалам пиковой интенсивности (или им эквивалентным, например мощности) управление, осуществляемое по правилу

$$\Theta_{N+1} = \Theta_N + \frac{\gamma}{J^2L^2}\,\frac{\partial J}{\partial\Theta_N} \tag{1}$$

при $\gamma = \gamma_0/2$, эквивалентно отработке фокусировки по осям $x$, $y$ пучка с оптимальным изменением константы управления. Следовательно, (1) представляет собой практический способ реализации управления фокусировкой пучка с максимальным быстродействием. В общем случае при управлении волновым фронтом 5 светового пучка вместо (1) получим

$$S_{N+1} = S_N + \frac{\gamma}{J^2L^2}\,\frac{\partial J}{\partial S_N}\,. \tag{2}$$

Данный алгоритм существенно повышает быстродействие адаптивной системы при фокусировке пучка в неподвижной среде, либо при предварительной коррекции его смещения в движущейся среде при управлении волновым фронтом по алгоритмам, принадлежащим классу градиентных методов. Численные эксперименты, проведенные в [1] как для оптимизации фокусировки, так и для оптимизации волнового фронта пучка, подтверждают сделанный здесь вывод.

Если информацию о положении приемника получить трудно, то целесообразно использовать алгоритм вида

$$S_{N+1} = S_N + \frac{\gamma}{J}\,\frac{\partial J}{\partial S_N}\,. \tag{3}$$

Его сходимость, устойчивость и быстродействие определяются начальной мощностью пучка и не зависят от расстояния до приемника. Так, при настройке по критерию пиковой интенсивности для монотонного режима отработки оптимальных параметров достаточно выполнения условия $2\gamma/(1 + \alpha) < 1$.

Еще одним важным достоинством управления по (3) является малая вероятность возникновения стохастических режимов работы адаптивной системы.

Построение алгоритма, аналогичного (1) либо (2) и реализующего оптимальные законы изменения $\gamma_{N+1}^{(x)}$ ((8′), (8″), см. ч. I статьи) при коррекции смещения центра пучка в толстом слое нелинейной среды, представляет сложную задачу, которую в ближайшее время предстоит решить. Здесь рассмотрим некоторые возможные подходы к построению такого алгоритма. Так, сходимость следующего итерационного процесса для $\Theta_N^x$ при коррекции смещения центра пучка

$$\Theta_{N+1}^{(x)} = \Theta_N^{(x)} + \frac{\tilde{\gamma}_{N+1}^{(x)}}{JL^2}\,\frac{\partial J}{\partial\Theta_N^{(x)}} \tag{4}$$

в случае других фиксированных параметров управления (фокусировки и т. д.) явно не зависит от расстояния до приемника, а также от положения центра пучка, что свойственно (7) (см. ч. I настоящей статьи). Для (4) автоматически реализуются экспоненциальные зависимости оптимальных значений $\gamma_{N+1}^{(x)}$ от положения центра пучка, что значительно улучшает условия адаптации, в частности, упрощается выбор оптимального для (4) $\tilde{\gamma}_{N+1}^{(x)}$, которое зависит лишь от $f_N^2$. Поэтому преимущество алгоритма (4) по сравнению с традиционно используемым очевидно. Однако при коррекции смещения пучка по (4) требуется, чтобы фокусировка оставалась постоянной в процессе управления наклоном.

Если имеется информация о максимальной интенсивности оптического излучения на приемнике ($J_m$), то управление $\Theta_N^{(x)}$ по правилу

$$\Theta_{N+1}^{x} = \Theta_N^{(x)} + \frac{\gamma_0^{(x)}}{JJ_mL^2}\,\frac{\partial J}{\partial\Theta_N^{(x)}} \tag{5}$$

и управление $\Theta_N^{(x)}$ по (7) (см. ч. I настоящей статьи) с оптимальным выбором $\gamma_{N+1}^{(x)}$ ((8′), (8″), см. ч. I настоящей статьи) эквивалентны (в этом нетрудно убедиться, если учесть, что $J_m \sim 1/f_N^2$). Следовательно, алгоритм (5) является оптимальным с точки зрения максимальной скорости достижения оптимального значения $\Theta_{\text{опт}}^{(x)}$ в классе градиентных методов при коррекции смещения центра пучка.

Из сравнения (1)—(5) следуют важные практические выводы: во-первых, компенсацию смещения центра пучка и его фокусировку на приемник целесообразно проводить отдельно друг от друга (см. также [2]); во-вторых, для реализации максимальной скорости достижения оптимальных условий концентрации световой энергии на приемник управление фокусировкой и наклоном волнового фронта пучка необходимо осуществлять по разным алгоритмам (например по (2) и (5)).

Необходимо также отметить, что если оптимальные законы изменения констант управления нереализованы, то итерационный процесс отработки оптимального распределения $S$ сходится (считаем, что для этого выполнены необходимые условия) как геометрическая прогрессия со знаменателем $q$, равным $1-c\gamma$, где $c$ — константа, т. е. линейно по $q$. Добиться большей скорости сходимости в классе градиентных методов нельзя, так как они, по существу, являются методами простой итерации для нахождения корней уравнения

$$\partial J/\partial S = 0. \tag{6}$$

Чтобы ускорить достижение оптимальных значений фокусировки пучка, наклона волнового фронта и других параметров (например, чтобы соответствующие итерационные процессы сходились со знаменателем $q^2$), необходимо обратиться к алгоритмам, не принадлежащим к классу градиентных методов, например к методу Ньютона для решения нелинейных уравнений [3, 4], который имеет квадратичную сходимость вблизи корня соответствующего уравнения. Использование метода Ньютона предполагает в данном случае организацию управления по правилу

$$S_{N+1} = S_N + \gamma\,\frac{\partial J/\partial S_N}{|\,\partial^2 J/\partial S_N^2\,|}\,. \tag{7}$$

Заметим, что наличие модуля у второй производной в (7) принципиально из-за специфики задачи. Анализ показывает (см. [5]), что алгоритм (7)обладает рядом преимуществ перед градиентными методами.

2. *Рассмотрим проблему повышения быстродействия многоканальных адаптивных систем.* Как известно, в адаптивной оптике сейчас принято располагать приводы гибкого зеркала таким образом, чтобы одни из них участвовали в фокусировке пучка, другие устраняли астигматизм, третьи — кому и т. д. Данный подход оправдан при фокусировке пучка в линейной среде, либо при изучении вклада в эффективность компенсации различных аберраций. При сильном же нелинейном отклике может оказаться более выгодным (с точки зрения числа приводов), когда один и тот же привод участвует в компенсации нескольких типов аберраций. В этом случае встает вопрос об их оптимальном способе размещения на зеркале, от которого зависит организация управления в адаптивной системе и, в конечном счете, ее быстродействие. Так, для случая слабого взаимного влияния приводов можно организовать параллельное управление ими. Однако при достаточно плохом перекрытии действия отдельных приводов снижается качество управления, так как не формируется требуемый волновой фронт светового пучка. Если же действие отдельных приводов сильно перекрывается, то зеркало представляет собой систему с сильными связями между каналами управления, и нарушение сходимости итерационного процесса оптимизации в каком-либо канале неизбежно повлияет на сходимость процесса в других каналах. Сравнение различных вариантов расположения приводов гибкого зеркала с точки зрения их взаимного перекрытия выполнено в [6].

Важно подчеркнуть, что число приводов на гибком зеркале желательно минимизировать для повышения быстродействия системы. Поэтому может оказаться, что ни один из предложенных, например в [6], вариантов размещения (а в них все приводы размещены на одинаковых расстояниях) не может быть реализован из-за недостаточного для равномерного расположения по поверхности зеркала числа приводов. В этой ситуации целесообразно учесть амплитудное распределение пучка и более плотно расположить приводы в области с максимальной интенсивностью и менее плотно — на периферии пучка. Тогда наиболее интенсивная часть пучка будет качественнее сфокусирована, чем при равномерном распределении приводов на зеркале, что может привести к более высокой концентрации световой энергии на приемнике, в частности, к его максимальной интенсивности. На мой взгляд, размещение приводов с учетом профиля пучка позволит существенно сократить их общее число без значительного сокращения качества фокусировки пучка.

При использовании гибких зеркал целесообразно также вводить демпфирование, которое эффективно достигается посредством введения ограничений на отклонение формы зеркала, например от плоского профиля [7]. Существенно, что в этом случае происходит регуляризация процесса адаптации, в результате чего минимизируемый функционал становится выпуклым, а его зависимость от оптимизируемых параметров будет однозначной. Имеет место также некоторое увеличение (примерно в два раза) быстродействия адаптивной системы [7].

Еще один аспект управления гибкими (или сегментированными) зеркалами заключается в следующем. Как показывают численные эксперименты, скорость достижения оптимальных возмущений приводов при постоянном значении (например, оптимальном с точки зрения сходимости алгоритма управления) констант управления (обозначим его через $\gamma_{\text{опт}}$) по каждому из каналов зависит от положения привода относительно центра пучка: более близкие к нему достигают своего оптимального значения раньше. Поэтому для повышения быстродействия многоканальной адаптивной системы управление по каждому каналу целесообразно проводить с разными константами $\gamma_p = \gamma_{\text{опт}}\tilde{\gamma}_p$, где $p$ — номер канала. Получим зависимость $\tilde{\gamma}_p$ от начального профиля пучка $A_0(x, y)$ и функции отклика $\Phi_p(x, y)$ приводов. Для этого рассмотрим итерационный процесс оптимизации возмущений $\Theta_p$ приводов.

Как известно, в гибких зеркалах требуемая их форма создается за счет возмущений, приложенных в некоторых точках зеркала:

$$S(x, y) = \sum_{p=1}^{M} \Theta_p \Phi_p(x, y), \tag{8}$$

где $M$ — общее число приводов. Считаем, что при возрастании номера привода расстояние от него до центра пучка не уменьшается. Оптимизация $\Theta_p$ по градиентному методу с целью максимизации выбранного критерия $J$ осуществляется по правилу

$$(\Theta_p)_{N+1} = (\Theta_p)_N - (\gamma_p)_{N+1} \frac{\partial J}{\partial (\Theta_p)_N}, \quad p = 1 - M. \tag{9}$$

Используя стандартный способ вычисления производной функционала (см., например [8]) через решение уравнения, сопряженного с квазиоптическим уравнением относительно комплексной амплитуды пучка $A(L, x, y)$, нетрудно получить, что

$$\frac{\partial J}{\partial (\Theta_p)_N} = 2IM \int\int \Phi_p(x, y) \{A_0(x, y)\, e^{iS(x,y)} \psi^*(0, x, y)\}\, dxdy, \tag{10}$$

где $IM$ означает, что берется мнимая часть интеграла; звездочка у функции $\psi$ — сопряжение; $\psi$ — решение спряженного уравнения; $S$ определяется по (8).

Из (10) следует, что с ростом номера привода значение интеграла, а значит и производной функционала, изменяется как

$$\eta_p = \int\int \Phi_p(x, y)\, A_0(x, y)\, dxdy, \tag{11}$$

и оно уменьшается для гипергауссовых пучков с ростом расстояния от центра пучка до очередного привода, приводя к замедлению процесса адаптации. Поэтому для выравнивания приращений по каждому из каналов необходимо в (10) учесть значение $\eta_p$:

$$\gamma_p = \gamma_{\text{опт}}/\eta_p = \gamma_{\text{опт}}\tilde{\gamma}_p. \tag{12}$$

Константы управления в $p$-канале должны быть изменены в $\tilde{\gamma}_p = 1/\eta_p$ раз. В этом случае скорости отработки оптимальных возмущений приводов выравниваются.

3. *Выводы*. Таким образом, показано, что изменения констант управления по разным каналам должно осуществляться по своим законам. Рассмотрено несколько способов модернизации градиентного метода, которые позволяют устранить многие трудности при оптимизации волнового фронта пучка по данному алгоритму, в частности, устранить зависимость его сходимости от расстояния до мишени, начальной мощности пучка и т. д.


1. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 8. С. 1617.
2. Кожевникова И.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1985. № 2. С. 13.
3. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1987. 271 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 640 с.
5. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 133.
6. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1988. Т. 52. № 2. С. 377.
7. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 4. С. 693.
8. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 518 с.



Московский госуниверситет
им. М.В. Ломоносова



Поступила в редакцию
3 декабря 1989 г.


V.A. Trofimov. **Increased Speed of Adaptive Control of Light Beam Wave Front in Multidither Algorithm. Part II. Practical Realization of the Algorithm.**


Practical applications of the optimal rules of the control constant variations are considered. The feasibility of the beam control implementation without resorting to any gradient methods is discussed.