

В.А. Трофимов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Дается обзор используемых в настоящее время алгоритмов управления параметрами светового излучения и их реализации в численных экспериментах с целью компенсации его нелинейных искажений. Обсуждаются причины расходимости алгоритма фазового сопряжения. Иллюстрируется зависимость результатов фокусировки по этому алгоритму от шага интегрирования по продольной координате. Получены гистерезисные зависимости принимаемой в заданную апертуру мощности оптического излучения от начальной мощности светового импульса.

Введение

Компенсация амплитудно-фазовых искажений (в частности, нелинейных искажений) оптического излучения представляет большой интерес для практически важных задач, таких как транспортировка световой энергии, локация различных объектов, передача информации и т. д. и представляет интерес для различных исследователей на протяжении последних 15 лет (см., например, [1–5]). Как известно, многие закономерности адаптивного и программного управления параметрами оптического излучения выявлены с помощью математического моделирования и моделирования на ЭВМ, которые положены в основу данной статьи, состоящей из четырех частей.

В первой части рассматриваются вопросы организации управления волновым фронтом светового пучка. При этом основное внимание уделяется проблемам, которые ранее не рассматривались в обзорах и не столь широко обсуждались в оригинальных работах. Среди них отмечу следующие: влияние запаздывания в каналах управления и в выработке сигнала на режимы работы адаптивной системы, существование инвариантов нелинейного взаимодействия двух волн, наличие бистабильных зависимостей принимаемой в заданную апертуру мощности от начальной мощности пучка при динамическом взаимодействии волн, методики численного моделирования.

Вторая часть посвящена проблеме формирования волновых фронтов различными системами, в частности, некоторым вопросам размещения приводов гибкого зеркала (к которым сейчас снова возрос интерес [6, 7]), формированию требуемой поверхности сегментированным зеркалом и системами обращения волнового фронта (ОВФ). Обсуждается число мод, необходимых для эффективной компенсации случайных искажений, вносимых тонким турбулентным слоем.

В третьей части статьи обсуждается выбор оптимального профиля пучка в классе заданных функций (гипергауссовских, гипертрубчатых, эллиптических) при различных условиях на трассе распространения и, в частности, блуждание центра тяжести профилированного пучка, прошедшего слой флуктуирующей среды. Последняя часть посвящена относительно новому классу задач атмосферной оптики: искажению амплитудно-фазовых характеристик оптического излучения вследствие изменения состава вещества из-за химической реакции в области пучка.

Как известно (см., например, [8, 9]), вблизи резонанса резко возрастает скорость поглощения световой энергии молекулами какого-либо сорта в смеси газов. Если длительность импульса существенно превышает время релаксации возбужденной молекулы с последующей передачей запасенной энергии в тепло, то можно считать, что основное воздействие оптического излучения связано с изменением лишь поступательной температуры смеси газов и концентраций их компонент. Именно это приближение рассматривается нами. Отмечу, что помимо задач транспортировки световой энергии и передачи информации данные задачи могут также найти приложения в проблемах зондирования атмосферы и спектроскопии. Поэтому здесь представлен краткий обзор выполненных нами исследований, а также обсуждается особенность численного моделирования процесса взаимодействия оптического излучения со смесью газов, состав которой изменяется под его воздействием.

Алгоритмы управления параметрами оптического излучения

В данном пункте обратим внимание на некоторые особенности расчета критериев качества и алгоритмов управления.

Одним из методов управления параметрами светового пучка является алгоритм апертурного зондирования, который описывается в общем случае системой дифференциальных или разностных уравнений вида [10, 11]

$$L\theta = \hat{\gamma}\Phi(J(\theta, z, \alpha)), \quad (1)$$

где z — расстояние до приемника, нормированное на дифракционную длину; α — отношение мощности пучка к характерной мощности самовоздействия, L — линейный оператор, определяемый функцией отклика адаптивной системы; $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_{M_0}\}$ — вектор оптимизируемых параметров оптического

излучения; M_0 — их максимальное число (т. е. число степеней свободы); $\hat{\gamma}$ — матрица, определяющая как величину текущего изменения по оптимизируемому параметру, так и очередность управления θ_j . Вектор Φ зависит от способа оценки J (качества компенсации) и алгоритма вычисления приращения функционала. В частности, при использовании градиентных методов, широко применяемых на практике при анализе систем апертурного зондирования (см., например, [1–7, 10–12]) $\Phi_r = \partial J / \partial \theta$. Отмечу, что в последние годы нами предложены отличные от традиционных градиентных методов [10, 13, 14] способы оптимизации параметров светового пучка, которые свободны от некоторых присущих градиентному методу недостатков,

В основе другого метода организации управления волновым фронтом S светового пучка лежит алгоритм фазового сопряжения

$$S_{N+1} = -S_N^{(\text{отр})}, \quad N = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где N — номер итерации; $S^{(\text{отр})}$ — волновой фронт отраженного от объекта оптического излучения. Как было показано в [15–17], этот алгоритм теряет сходимость уже при умеренных значениях нелинейности. Однако в связи с тем, что ее отсутствие может быть обусловлено численным моделированием, а не природой алгоритма (см. ниже), то, на мой взгляд, требуется провести более детальное исследование его сходимости, в частности с использованием динамической модели распространения световых волн.

Важную роль как при программном, так и при адаптивном управлении играет метод расчета критерия качества, по которому оценивают результаты оптимизации параметров оптического излучения. В литературе предложено несколько способов их расчета. Один из способов — это использование тождества Лагранжа [18, 19] для записи сопряженной системы уравнений, через которую связывают приращение функционала j с приращением оптимизируемых параметров. Данный метод применяют при программном управлении параметрами пучка.

Второй способ состоит в расчете критерия с помощью отраженной волны [4, 7, 16], распространяющейся в поле мощной падающей волны, без учета влияния отраженной волны на состояние среды (т.е. на изменение показателя преломления). При этом нарушается фундаментальное свойство взаимодействия встречных волн: симметричность уравнений распространения, что приводит к потере инварианта [20–22], отражающего сохранение «фазы» взаимодействующих волн. Это, несомненно, при нелинейном распространении оказывает влияние на процесс оптимизации (сходимость алгоритма адаптивной фокусировки) волнового фронта светового пучка. Важно также подчеркнуть, что при моделировании работы адаптивных систем всегда использовалась стационарная (в смысле распространения оптических волн) модель взаимодействия падающего и отраженного оптического излучения. Данное обстоятельство также накладывает некоторые ограничения на результаты моделирования в нелинейной среде. Это утверждение следует из аналогии между моделированием адаптивной фокусировки пучка и обращения волнового фронта (ОВФ) во встречных пучках накачек [23, 24], один из которых создается за счет отражения другого от зеркала, расположенного за слоем нелинейной среды: в обоих случаях реализуется итерационный процесс определения решения по аналогичным правилам и присутствует связь краевых условий в сечении расположения приемника. Известно [25, 26], что в общем случае в прозрачной среде, во-первых, доказать сходимость подобного итерационного процесса не удастся, можно лишь показать его ограниченность. Проводимое нами численное моделирование ОВФ по указанной выше схеме показывает, что сходимость итераций всегда присутствует при наличии диссипации энергии оптического излучения.

Во-вторых, при переходе от динамической модели взаимодействия к стационарной происходит потеря времени запаздывания (влияние запаздывания обсуждается ниже) пробега волны источника излучения до приемника и обратно. В стационарной модели роль времени запаздывания играет номер итерации.

В-третьих, исследование на ЭВМ динамики взаимодействия встречных волн, например в среде с локальным откликом, показало существование бистабильной зависимости принимаемой в апертуру мощности от падающей мощности, от формы импульса оптического излучения. Кратко остановимся на этом. (Результаты по взаимодействию встречных волн получены совместно с И.Г. Захаровой и Ю.Н. Карамзиным и будут подробно опубликованы в отдельной работе). Встречное взаимодействие световых импульсов в среде с локальным откликом в условиях существенного различия времен жизни наведенных взаимодействующими волнами решеток диэлектрической проницаемости с разными пространственными периодами (что характерно для полупроводников) описывается следующей системой дифференциальных безразмерных переменных:

$$\frac{\partial A_+}{\partial t} + \frac{\partial A_+}{\partial z} + i\Delta_{\perp} A_+ + i\alpha (|A_+|^2 + |A_-|^2) A_+ = 0,$$

$$\frac{\partial A_-}{\partial t} - \frac{\partial A_-}{\partial z} + i\Delta_{\perp} A_- + i\alpha(|A_+|^2 + |A_-|^2) A_- = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями

$$A_+|_{z=0} = \begin{cases} \exp(-((t-t_0)/\tau_u)^2 - x^2(1+i\theta)), & t \leq 2, t \geq 7, \\ 1, & \end{cases}$$

$$A_-|_{z=z_0} = A_+|_{z=z_0} (1 - \exp(-(x/R_a)^2)) \exp(i \arctg(x^2/R_3)), \quad 2 < t < 7, \quad (4)$$

где A_{\pm} — нормированные на максимальное значение комплексные амплитуды соответственно падающего и отраженного от приемника, расположенного в сечении $z_0 = 1$, пучков; t — время, нормированное на длительность пробега импульсом расстояния до приемника; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2$ — оператор Лапласа по переменной x (для простоты анализировалось распространение щелевых пучков); R_a — размер приемной апертуры, выраженный в единицах начального радиуса пучка; R_3 — кривизна зеркала; τ_u — параметр, характеризующий длительность импульса и крутизну фронтов; θ характеризует фокусировку пучка. Очевидно, при записи (4) считалось, что в пределах R_a мощность пучка либо поглощалась приемником, либо проходила через отверстие. Отмечу, что данная схема взаимодействия волн используется рядом авторов в экспериментах по поперечной оптической бистабильности.

В численных экспериментах для широкого набора параметров α , R_3 , θ , z_0 , R_a , τ_u были обнаружены гистерезисные зависимости мощности $P_{\text{вых}}(t)$, принимаемой в гауссовскую апертуру радиусом R_a , от начальной мощности $P_{\text{вх}}(t)$ пучка. Типичная из них представлена на рис. 1, где стрелки соответствуют временному изменению начальной мощности оптического излучения. Шириной петли и их числом можно управлять, изменяя параметр нелинейности, фокусировку пучка, радиус апертуры и кривизну отражающего зеркала. При этом аналогичные зависимости реализуются и для отраженной обратно в среду мощности пучка. Причина такой зависимости выходной мощности от входной заключается в наличии обратной связи между отраженной и падающей волнами. Так, при увеличении мощности падающего пучка возрастает его дефокусировка. Это приводит к уменьшению выходной мощности в апертуре R_a и увеличению доли мощности, отраженной обратно в среду, что, в свою очередь, усиливает дефокусировку. Замечу, что центральная часть падающего пучка не отражается и поэтому падающее оптическое излучение фокусируется за счет линзы, наведенной отраженным пучком из-за наличия в его профиле минимума интенсивности на оси, что приводит к увеличению мощности оптического излучения, попадающей в апертуру R_a . Конкуренция этих двух процессов приводит к той сложной зависимости $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{вх}}$, представленной на рисунке. Нетрудно видеть, что в случае отказа от динамической модели и использования итерационной процедуры для нахождения решения, ее сходимость может отсутствовать и значение мощности будет осциллировать, повторяя свое значение, например через итерацию.

Следует также подчеркнуть, что в динамической модели присутствует еще одно характерное время: время τ_3 пробега светового импульса до приемника и обратно. Для замкнутой системы, когда информация отраженного пучка используется для фокусировки оптического излучения, данное время играет роль времени запаздывания [27, 28]. Если отношение времени τ_3 к постоянной времени адаптации τ_a не удовлетворяет условию

$$\tau_3/\tau_a \leq 0,37, \quad (5)$$

то реализуются осциллирующие (либо расходящиеся) режимы работы адаптивной системы при непрерывном алгоритме управления в системе апертурного зондирования. Следовательно, для устойчивости процесса автофокусировки постоянная адаптации должна быть ограничена снизу. Замечу, что аналогичное ограничение (но из условия максимального быстродействия) возникает при динамической компенсации самовоздействия светового пучка [29] при $\tau_3 = 0$.

Если же соотношение времен таково, что выполняется условие

$$\tau_3/\tau_a = \pi/2 + 2\pi n, \quad n=0, 1, 2 \dots, \quad (6)$$

то в адаптивной системе реализуется периодический режим изменения параметров оптимизации. Для значений τ_a , τ_3 , удовлетворяющих неравенству

$$2\pi n < \tau_3/\tau_a < \pi/2 + 2\pi n, \quad n=1, 2, \dots, \quad (7)$$

фокусировка пучка происходит по затухающему осциллирующему закону, а для времен из интервала

$$\pi/2 + 2\pi n < \tau_3/\tau_a < \pi(2n+1), \quad n=1, \dots \quad (8)$$

имеет место расходящийся процесс фокусировки. Таким образом, в системе с запаздыванием существуют периодические интервалы неустойчивости ее работы.

Наличие инерции, которое характеризуется временем $\tau_{ин}$, у элементов адаптивной системы приводит, с одной стороны, к повышению устойчивости процесса фокусировки, с другой стороны, к уменьшению с ростом $\tau_{ин}$ ее быстродействия (см. рис. 2). Замечу, что для быстрой ($\tau_a < \tau_3$) адаптивной системы с инерцией могут существовать периодические процессы изменения параметров пучка, причем их спектральный состав содержит $2n+1$ гармонику, если соотношение времен удовлетворяет условию

$$\tau_a \tau_{ин} \tau_3^{-2} = \left(\frac{3\pi}{2} + 2\pi(n+1) \right)^{-2}. \quad (9)$$

Следовательно, с уменьшением τ_a число гармоник увеличивается как $1+2n$.

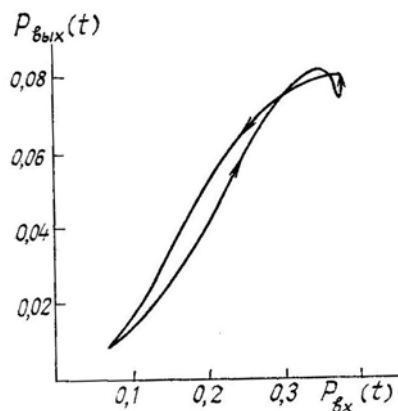


Рис. 1 Зависимость мощности $P_{\delta_{вых}}(t)$, принимаемой в апертуру $R_a = 0,66$, от начальной мощности $P_{\delta_x}(t)$ для гауссовского импульса. Параметры задачи $\alpha = 20$, $z_0 = 1$, $\tau_1 = 2$, $t_0 = 2$, $\theta = 0$, $P_3 = 0,33$

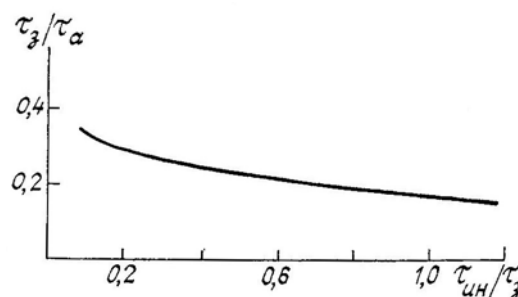


Рис. 2 Зависимость отношения τ_3/τ_a , при котором достигается максимальное быстродействие в инерционной адаптивной системе, от ее времени инерции $\tau_{ин}/\tau_3$

В заключение обсуждения проблем, связанных с алгоритмами управления, кратко рассмотрим еще несколько важных вопросов. Как известно, при адаптивном и программном управлении важную роль играет быстродействие систем, так как именно оно определяет качество фокусировки пучка на перемещающийся приемник и при нестационарном самовоздействии. Отмечу, что различные способы повышения (и достижения максимального быстродействия) подробно изложены в [10], где обобщены ранее предложенные нами алгоритмы управления фокусировкой и наклонами волнового фронта, имеющие максимальное быстродействие. Важно подчеркнуть, что данные алгоритмы являются наилучшаемыми в классе градиентных методов.

Еще одно замечание относится к способу организации управления, рассмотренного в [30]. Вопросы устойчивости управления одновременно по различным критериям качества для разных компонент вектора $\{\theta_i\}$ (фокусировки, наклона) затрагивались также в [31, 32]. В отличие от [30] в этих работах использовался градиентный метод, который в данном случае является предпочтительным по следующим причинам. Во-первых, для градиентного метода известен способ достижения максимального быстродействия и режимы работы адаптивной системы: Во-вторых, в отличие от [30] нет необходимости обращать матрицу (в общем случае) градиентов функционалов по параметрам управления, что существенно усложняет работу адаптивной системы, например в случае нелинейного распространения. В-третьих, не нужно знать экстремальные значения критериев качества, которые известны лишь для случая линейной среды. В-четвертых, использованный в [30] итерационный процесс является трехточечным, что также усложняет работу адаптивной системы. (Это следует, например, из результатов работы [31], где предложены и проанализированы трехточечные алгоритмы, в основу которых положен градиентный метод). Важно также подчеркнуть, что реализация оптимальных условий возможна лишь при условии, если заранее известно экстремальное значение функционала (очевидно, его можно априори определить только в линейной среде). В противном случае, как показывает анализ, может происходить срыв процесса адаптации при попадании значения оптимизируемого параметра в некоторый интервал вблизи его оптимума. Величина интервала определяется ошибкой задания экстремального значения функционала.

Следует отметить, что проведенное исследование по фокусировке гауссовского пучка в гауссовскую приемную апертуру $R_a = 0,25$, расположенную в сечении $z = 1$ линейной среды с помощью алгоритма фазового сопряжения показало, что в зависимости от шага интегрирования по продольной координате при фиксированной кубической сетке по поперечной координате достигается различная концентрация мощности на приемнике (см. таблицу). В случае же нелинейного распространения (например, в кубичной среде) реализовывались осциллирующие режимы, причем среднее значение осцилляций определялось шагом интегрирования по продольной координате. Таким образом, для окон-

чательного ответа на вопрос о природе осциллирующих критерия в алгоритме фазового сопряжения следует провести моделирование процесса фокусировки на адаптируемых к решению сетках.

Зависимость принимаемой в апертуру $R_a = 0,25$ мощности гауссовского пучка от шага интегрирования по продольной координате при фокусировке оптического излучения по алгоритму фазового сопряжения

h_z	0,1	0,083	0,05	0,04	0,01	0,005
P	0,164	0,171	0,192	0,2	0,223	0,238

И последнее, что хотелось бы подчеркнуть, относится к использованию безабберационного описания распространения пучков для анализа алгоритмов управления. Полученные на его основе закономерности многократно подтверждались нами в численных экспериментах. Сейчас аналогичные подтверждения можно найти в работах других авторов (см., напр., [7]), где получены зависимости эффективности оптимизации от длины трассы и параметра нелинейности. Нетрудно видеть, что они хорошо согласуются с аналогичной зависимостью, полученной в [34, 35].

1. Харди Д. У. Активная оптика. Новая техника управления световым пучком. // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31–85.
2. Адаптивная оптика: Пер. с англ. /Под ред. Э.А. Витриченко. М.: Мир, 1980. 454 с.
3. Беспалов В. И., Пасманик Г. А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1986. 134 с.
4. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1986. 336 с.
5. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 284 с.
6. Шишаков К. В., Шмальгаузен В. И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 326–328.
7. Канев Ф. Ю., Чесноков С. С. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 302–307.
8. Лазерные системы/Под ред. В.П. Чеботаева. Новосибирск: Наука, 1980. 201 с.
9. Шмелев В. М., Захаров В. И., Нестеренко А. И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 6. С. 597–604.
10. Трофимов В. А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 1. С. 68–79.
11. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. Математическое моделирование в нелинейной оптике. М.: Издательство Московского ун-та, 1989. 154 с.
12. Выслоух В. А. и др. // Известия вузов. Сер. Физика. 1985. Т. 28. № 11. С. 30–41.
13. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2261–2263.
14. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Известия АН СССР. Сер. Физическая. 1988. Т. 52. № 2. С. 377–382.
15. Ахманов С. А. и др. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 3–37.
16. Воронцов М. А., Чесноков С. С. // Известия вузов. Сер. Физика. 1980. Вып. 10. С. 15–20.
17. Сафонов А. И. // Автометрия. 1981. № 2. С. 13–17.
18. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П. // Известия АН СССР, Сер. Физическая. 1978. Т. 42. № 12. С. 2547–2559.
19. Федоренко Р. П. Приближенное решение задачно оптимального управления. М.: Наука, 1978. 408 с.
20. Трофимов В. А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1146–1147.
21. Поляков С. В., Трофимов В. А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 10. С. 1304–1306.
22. Трофимов В. А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1990, Т. 33. (В печати).
23. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Известия АН СССР. Сер. Физическая. 1987. Т. 51. № 2. С. 340–346.
24. Ковалев В. И., Трофимов В. А. V Всесоюз. конференция «Оптика лазеров» (Тезисы докл.). Л.: Изд-во ГОИ им. С.И. Вавилова. 1987. С. 357.
25. Карамзин Ю. Н., Конев Ю. Б. Численное исследование работы неустойчивых телескопических резонаторов с учетом дифракции и эффекта насыщения в активной среде. М.: 1974, 24 с. (Препринт/ИИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. № 57).
26. Захарова И. Г., Карамзин Ю. Н. // Дифференциальные уравнения. 1984. Т. 20. № 7. С. 1213–1221.
27. Трофимов В. А. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 59. Вып. 5. С. 1153–1155.
28. Трофимов В. А. // Автометрия. 1987. № 2. С. 29–33.
29. Трофимов В. А. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 11. С. 2379–2381.
30. Кандидов В. П. и др. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1187–1194.
31. Трофимов В. А. Оптимальное и адаптивное управление параметрами световых пучков, распространяющихся в средах с нелинейным показателем преломления. Канд. диссертация. М.: Московский госуниверситет. 1983. 162 с.
32. Кожевникова И. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Известия вузов. Сер. Физика. 1985. Т. 28. № 2. С. 13–19.
33. Трофимов В. А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 4. С. 505–515.
34. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Известия АН СССР. Сер. Физическая. 1982. Т. 46. № 10. С. 1933–1938.
35. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. // Известия АН СССР. Сер. Физическая. 1984. Т. 48. № 7. С. 1424–1429.

V. A. Trofimov. Some Problems of Compensation of Nonlinear Distortions of the Optical Radiation. Algorithms of Adaptive Control.

This paper presents an overview of algorithms being now used for the light parameters control and of their applications to numerical simulations on the compensation of nonlinear distortions of radiation. The causes of divergency of the phase conjugation technique are discussed. The dependence of the quality of beam focusing made using this algorithm on the Increment of integration over the longitudinal coordinate is given. The dependence of optical radiation power collected by a given aperture on the initial power of 'a light pulse is shown to have a hysteresis shape.