

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 621.375:551.521

Ф.Ю. Канев, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин

Устойчивость алгоритмов фазового и амплитудно-фазового управления пучком в нелинейной среде

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 17.12.2002 г.

Рассмотрено управление пучком в условиях теплового самовоздействия на основе алгоритмов фазового сопряжения и обращения волнового фронта. Проведен анализ устойчивости этих двух методов коррекции нелинейных искажений. Показано, что нестабильность фазового сопряжения обусловлена нарушением принципа оптической обратимости. Строгое выполнение принципа позволяет добиться абсолютной устойчивости коррекции. Обращение волнового фронта в нелинейной среде также сопровождается нарушением принципа, что приводит к развитию осцилляций параметров светового поля на объекте фокусировки.

Известно, что компенсация нелинейных искажений лазерного излучения, выполняемая на основе алгоритма фазового сопряжения, является неустойчивой. Яном Херманом, автором одной из первых статей [1], посвященных данной проблеме, отмечалось, что, начиная с некоторого значения пороговой мощности, применение алгоритма приводит к росту расходимости корректируемого пучка, и это не позволяет существенно увеличить концентрацию светового поля в плоскости наблюдения. Наряду с расходимостью наблюдается нестабильность колебательного характера [2, 4, 5], т.е. осцилляции параметров излучения. Механизм развития осцилляций описан в работе [3]. Авторы полагают, что развитие автоколебательного режима объясняется размыканием петли обратной связи в адаптивной системе.

«Сильная» дефокусирующая линза на трассе приводит к обрыву связи и уменьшению концентрации поля на объекте фокусировки. С течением времени локальная тепловая линза перемещается в направлении ветра, и после ее выхода за пределы пучка обратная связь восстанавливается, параметры излучения в плоскости наблюдения возрастают. Более детальный анализ процесса управления, результаты которого представлены в настоящей статье, позволяет заключить, что в рассматриваемых условиях невозможно говорить о размыкании обратной связи в системе. По-видимому, причиной осцилляций является нарушение принципа оптической обратимости, лежащего в основе алгоритма фазового сопряжения.

Распространение лазерного излучения в слабопоглощающей однородной среде описывается [6] уравнением квазиоптики

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + R_0 T E \quad (1)$$

и уравнением теплопереноса

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha I, \quad I = \frac{cn_0}{8\pi} E E^* \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) использованы следующие обозначения: $E = E(x, y, z, t)$ – комплексная амплитуда светового поля; $T = T(x, y, z, t)$ – распределение температуры; n_0, α – невозмущенные значения показателя преломления и коэффициента ослабления соответственно; ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость; V_x, V_y – проекции скорости ветра на координатные оси; z – направление распространения пучка; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны. Основным критерий подобия системы уравнений (1) и (2) – параметр нелинейности R_0 – характеризует рефракционные свойства наведенной тепловой «линзы» и определяется по средней скорости ветра V_0 :

$$R_0 = \frac{2k^2 a_0^2 \alpha I_0}{n_0 \rho C_p V_0} \frac{\partial n}{\partial T} \quad (3)$$

Радиус передающей апертуры a_0 является пространственным масштабом задачи в плоскости, перпендикулярной направлению распространения $x' = x/a_0, y' = y/a_0$, а дифракционная длина $Z_d = ka_0^2$ – пространственным масштабом в направлении распространения, $z' = z/Z_d$. Для характеристики поля на объекте использовался критерий фокусировки:

$$J(x, y, z_0, t) = \frac{1}{P_0} \iint S(x, y) I(x, y, z_0, t) dx dy \quad (4)$$

пропорциональный плотности мощности светового поля. Здесь P_0 – полная мощность пучка; $S(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/a_0^2]$ – апертурная функция; $I(x, y, z_0, t)$ – интенсивность пучка в плоскости наблюдения.

Распределенная тепловая линза моделировалась набором искажающих фазовых экранов, помещенных на трассе распространения пучка. Для определения характерных особенностей коррекции геометрия задачи упрощалась, и на трассе располагался только один экран в середине дистанции от апертуры источника до плоскости наблюдения (рис. 1).

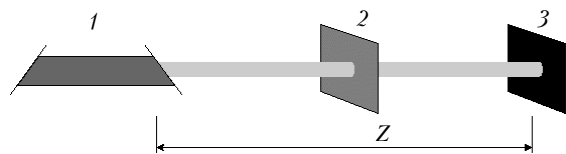


Рис. 1. Сценарий численного эксперимента по компенсации теплового самовоздействия: 1 – лазерный источник; 2 – фазовый экран; 3 – плоскость наблюдения

Рассматривалось управление пучком с использованием алгоритма фазового сопряжения и обращения волнового фронта (ОВФ). Решение выполня-

лось в приближении стационарной рефракции, т.е. изменения в фазовый (амплитудный и фазовый при реализации ОВФ) профиль излучения вносились с интервалами времени много больше длительности переходных процессов, развивающихся в системе «пучок–нелинейная среда». На дисплей компьютера выводились распределения интенсивности корректируемого излучения в плоскости наблюдения и на фазовом экране, распределение температуры на экране, а также интенсивности опорного излучения в плоскости апертуры лазера. Полученные при фазовом сопряжении результаты помещены в табл. 1 (один экран на трассе).

Таблица 1

Распределение светового и температурного полей в алгоритме фазового сопряжения (один искажающий экран расположен в середине трассы распространения)

Номер итерации	Распределение интенсивности опорного пучка	Распределение интенсивности и температуры на экране*	Распределение интенсивности в плоскости наблюдения	J
1				0,13
2				0,15
3				0,06
4				0,07
5				0,60
6				0,11
7				0,06

*Полутоновое изображение – температура; линии равного уровня – пучок.

На первой итерации начальный фазовый профиль пучка является плоским. На второй в результате фазового сопряжения пучок фокусируется, на искажающем экране уменьшается его радиус, повышается концентрация поля. В результате критерий $J(t)$, регистрируемый в плоскости объекта, увеличивается от 0,13 до 0,15. Но одновременно уменьшается размер тепловой линзы, поэтому опорный пучок на третьей итерации дефокусируется в меньшей степени. Меньшим становится радиус фокусировки корректируемого пучка (это видно по увеличению диаметра пучка на фазовом экране и уменьшению значения $J(t)$ до 0,06 на третьей итерации), увеличиваются размеры тепловой линзы. Затем вновь наблюдается увеличение дефокусировки опорного излучения, приводящее к увеличению фокусировки прямого пучка. В системе действительно развиваются автоколебания, но говорить о разрыве обратной связи, по-видимому, невозможно.

При реализации в нелинейной среде фазового сопряжения принцип оптической обратимости нарушается дважды. Во-первых, из-за того, что выполняется управление лишь фазой пучка, а амплитуда на входе в среду отличается от амплитуды опорного излучения (более подробно об этом написано в учебном пособии [7]). Во-вторых, потому, что опорный и корректируемый пучки проходят трассу с различными неоднородностями, так как изменение фазового профиля корректируемого пучка приводит к изменению распределения температуры и показателя преломления на трассе распространения. Для того чтобы продемонстрировать повышение устойчивости коррекции при соблюдении условий оптической обратимости, был выполнен следующий численный эксперимент. Обращение волнового фронта про-

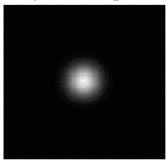
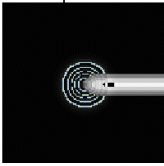
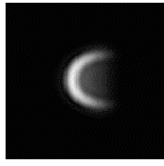
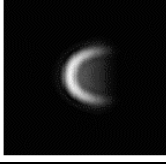
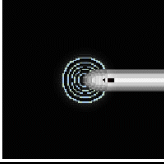
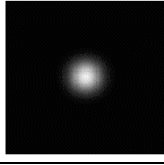
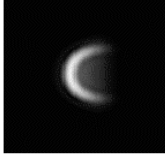
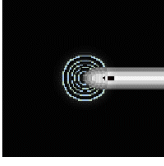
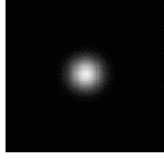
дилось для пучка, распространяющегося на трассе с одним фазовым экраном, расположенным в середине. На дисплей выводились такие же, как для случая фазового сопряжения, данные. Результаты представлены в табл. 2 (один экран).

В этом случае процесс сходится к максимальному значению критерия ($J = 0,5$) за одну итерацию. На первом шаге на искажающем экране пучок практически такой же, как в плоскости излучающей апертуры (небольшое увеличение радиуса за счет дифракции), на объекте фокусировки наблюдаются искажения. Полностью симметричным является процесс распространения опорного излучения: начальная амплитуда гауссовская, фаза плоская. На экране амплитуда остается гауссовской, после прохода излучения через экран его фаза изменяется. Фазовая добавка приводит к тому, что в плоскости апертуры источника опорный пучок приобретает серповидную форму. Здесь выполняется операция обращения волнового фронта. В результате на искажающем экране корректируемый пучок будет гауссовским, тепловая линза не изменится. В плоскости объекта искажения полностью отсутствуют. Полная компенсация искажений достигается за один итерационный шаг, в дальнейшем температурное поле на трассе и значения критерия в плоскости наблюдения не изменяются. Таким образом, можно заключить, что даже в нелинейной среде соблюдение оптической обратимости обеспечивает абсолютную устойчивость управления.

Отличающийся характер имеет управление на основе алгоритма обращения волнового фронта в случае, когда тепловая линза является распределенной (значения критерия $J(t)$, полученные при коррекции теплового самовоздействия для этого случая, приведены на рис. 2).

Таблица 2

Распределение светового и температурного полей в алгоритме ОВФ (один искажающий экран расположен в середине трассы распространения)

Номер итерации	Распределение интенсивности на входе в среду	Распределение интенсивности и температуры на экране*	Распределение интенсивности в плоскости наблюдения	J
1				0,13
2				0,5
3				0,5

*Полутонное изображение – температура; линии равного уровня – пучок.

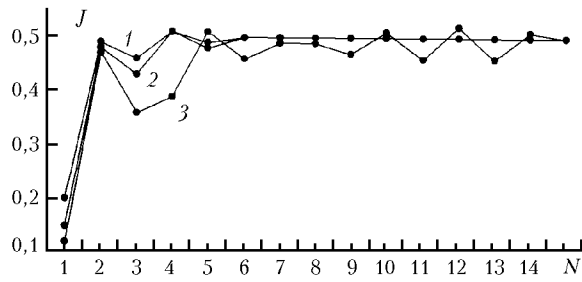


Рис. 2. Изменение критерия фокусировки при управлении на основе ОВФ. Параметры: длина трассы $Z = 0,50$; $R_0 = -20$ (кривая 1), -25 (кривая 2), -30 (кривая 3)

На начальных итерациях здесь вновь наблюдаются осцилляции концентрации поля, которые затухают при $|R_0| \leq 25$. И чем ниже нелинейность среды, тем меньше число итераций необходимо для затухания. Если $|R_0| > 25$, осцилляции критерия продолжаются с небольшой амплитудой.

Приведенное выше упрощение (один экран на трассе) в рассмотрении алгоритма ОВФ не позволяет объяснить осцилляции критерия $J(t)$ на начальных итерациях. Для более подробного анализа проводились эксперименты с распределенной линзой, в которых регистрировалось распределение температуры и амплитуды излучения на ближайшем к лазеру экране и на экране, ближайшем к объекту фокусировки. Данные приводятся в табл. 3.

На итерации № 1 на первом экране пучок является гауссовским, тепловая линза имеет небольшой поперечный размер. На последнем экране пучок

является гауссовским, тепловая линза имеет небольшой поперечный размер. На последнем экране пучок

Таблица 3

Распределение светового и температурного полей в алгоритме ОВФ. На трассе расположены 5 искажающих фазовых экранов ($Z = 0,5$; $R_0 = -25$)

Номер итерации	Распределение интенсивности опорного пучка	Распределение интенсивности и температуры на экране $Z = 0,1$	Распределение интенсивности и температуры на экране $Z = 0,4$	Распределение интенсивности пучка в плоскости наблюдения	J
1					0,17
2					0,48
3					0,44
4					0,51
5					0,49
6					0,50
7					0,50

серповидный, ширина линзы значительно больше, чем в начале трассы. На итерации № 7 ситуация прямо противоположна: широкий пучок и тепловая линза при $Z = 0,1$, гауссовский пучок меньшего радиуса (при соответствующем уменьшении размеров линзы) в плоскости $Z = 0,4$. Распределение светового и температурного полей на первой итерации и первом экране идентичны соответствующим распределениям полей на последней итерации и последнем экране. В результате управления тепловая линза «опрокидывается» и в дальнейшем остается неизменной. На итерациях, когда происходит этот процесс, значения критерия осциллируют. После стабилизации температурного поля на трассе распространения значения критерия не изменяются. По-видимому, после некоторого порогового значения интенсивности стабилизация температуры не достигается и в системе продолжают малые колебания параметров излучения.

Сравнение алгоритмов управления позволяет заключить, что потеря устойчивости фазового сопряжения в нелинейной среде обусловлена нарушением принципа оптической обратимости при реализации алгоритма. В средах с низкой нелинейностью ($|R_0| \leq 25$) обращение волнового фронта обеспечивает полную компенсацию искажений пучков, с увеличением мощности излучения в плоскости наблю-

дения развиваются осцилляции параметров поля. Появление колебаний также объясняется нарушением принципа оптической обратимости.

1. *Herrmann J.* Properties of phase conjugate adaptive optics // *J. Opt. Soc. Amer.* 1977. V. 67. № 3. P. 290–295.
2. *Зуев В.Е., Коняев П.А., Лукин В.П.* Минимизация атмосферных искажений оптических волн методами адаптивной оптики // *Изв. вузов. Физ.* 1985. Т. XXVIII. № 11. С. 6–29.
3. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
4. *Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П., Сухоруков А.П., Чесноков С.С.* Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации // *Изв. вузов. Физ.* 1980. Т. XXIII. № 1. С. 1–37.
5. *Коняев П.А., Лукин В.П.* Тепловые искажения лазерных пучков в атмосфере // *Изв. вузов. Физ.* 1983. Т. XXVI. № 2. С. 79–89.
6. *Выслоух В.А., Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов В.А.* Адаптивная фокусировка интенсивных световых пучков, распространяющихся в нерегулярных средах // *Изв. вузов. Физ.* 1985. Т. XXVIII. № 11. С. 30–41.
7. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Мakenова Н.А.* Моделирование распространения излучения в случайно-неоднородных средах и адаптивного управления пучком. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 21 с.

Kanev F.Yu., Lavrinova L.N., Lukin V.P. **Stability of algorithms of phase and amplitude-phase control over beam in a nonlinear medium.**

Beam control under thermal blooming conditions is considered based on the phase conjugation and wavefront reversal algorithms. The stability of these two methods for correction of nonlinear distortions is analyzed. The instability of phase conjugation is shown to be caused by violation of the principle of optical reversibility. Rigorous fulfillment of this principle allows achieving absolutely stable correction. Wavefront reversal in nonlinear medium is also accompanied by violation of the principle, which leads to development of oscillations in parameters of the light field on a focusing object.