

УДК 535.3

Адаптивная компенсация тепловых искажений многоканального лазерного излучения

Ф.Ю. Канев¹, Н.А. Макенова¹, В.П. Лукин¹,
О.Л. Антипов², И.Д. Веретехин^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт прикладной физики РАН
603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

³Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 9.10.2017 г.

Представлены результаты численного моделирования распространения многоканального когерентного излучения, искажения которого обусловлены стационарным тепловым самовоздействием. Также рассмотрена коррекция искажений на основе фазового и амплитудно-фазового управления волновым фронтом. Приводимые данные демонстрируют зависимость качества компенсации искажений от числа каналов оптической системы и точности восстановления фазы опорного излучения. Дополнительное повышение качества коррекции возможно при переходе от чисто фазового управления к амплитудно-фазовому, т.е. при регулировании усиления в каждом из каналов.

Ключевые слова: адаптивная оптика, тепловое самовоздействие, многоканальное излучение, фазовое сопряжение, амплитудно-фазовое управление излучением; *adaptive optics, thermal blooming, multichannel radiation, phase conjugation, amplitude-phase control over the beam wavefront.*

Введение

В настоящее время передача энергии лазерным излучением часто осуществляется с помощью многоканальных лазерных систем, в которых на объекте фокусировки выполняется когерентное сложение отдельных пучков [1–5]. Каждый из каналов такой системы включает усилители и оптические элементы, вносящие дополнительный (относительно других пучков) фазовый сдвиг. Указанное изменение фазы может быть получено в электрооптических ячейках [3, 4], нелинейных и пьезоэлектрических элементах [1, 2] или с использованием других приборов [6].

Интерес инженеров и исследователей к многоканальным системам обусловлен тем, что максимальная мощность одномодового излучения ограничена нелинейными тепловыми явлениями, развивающимися вдоль всего оптического тракта – в активной среде генератора, в атмосфере, на всех нагреваемых пучком оптических элементах. Плотность мощности излучения и, как следствие, вероятность появления искажений могут быть уменьшены при увеличении

эффективного диаметра апертуры источника благодаря разделению пучка на несколько каналов, при когерентном сложении которых на объекте достигается максимальное значение интенсивности.

В рассматриваемом относительно новом разделе физической оптики достаточно большой объем информации получен на основе методов численного эксперимента [7–10]. По-видимому, наиболее полное численное исследование многоканальных пучков, распространяющихся в неискажающей среде и в турбулентной атмосфере, было выполнено авторами публикаций [7, 8]. На основе полученных данных они сделали вывод, что при большом (> 30) числе каналов и их плотной упаковке многоканальная система обеспечивает такую же плотность мощности на объекте фокусировки, что и гауссов пучок соответствующего диаметра.

Влияние тепловых искажений на качество многоканального излучения и возможность повышения плотности мощности на объекте за счет фокусировки проанализированы в [9, 10]. Исследования проводились численными методами. Показано, что развитие самовоздействия в многоканальной системе ограничивает мощность, переносимую пучком в атмосфере. Адаптивное управление волновым фронтом авторами не рассматривалось.

В настоящее время также активно развиваются экспериментальные методы исследования многоканальных систем. В частности, большой интерес вы-

* Федор Юрьевич Канев (mna@iao.ru); Наиля Алтыханова Макенова (mna.05@mail.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Олег Леонидович Антипов (antipov@appl.sci-nnov.ru); Игорь Дмитриевич Веретехин (aswer95@inbox.ru).

зывают работы, в которых изучается практическая возможность компенсации атмосферных искажений излучения с использованием алгоритмов адаптивной оптики [11].

Анализ литературных источников показывает, что несмотря на достигнутый прогресс в данной области нерешенным остается ряд практически важных проблем, например проблема адаптивной компенсации тепловых искажений на протяженных атмосферных трассах. Интерес представляет также анализ возможности применения методов амплитудно-фазового управления для коррекции искажений, обусловленных самовоздействием излучения.

1. Модель многоканальной оптической системы

Схематичное изображение типовой многоканальной оптической системы [1, 3, 7, 9] приведено на рис. 1. Обратная связь в данной схеме замыкается опорным излучением, радиус которого выбирается большим или равным радиусу излучающей апертуры. Эту систему мы использовали при моделировании в настоящей работе. Адаптивная коррекция осуществляется за счет введения фазовой модуляции в каналах (фазовое управление) и управления усилением пучков (амплитудно-фазовое управление).

Распространение излучения в нелинейной среде описывалось уравнением квазиоптики [12]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + \frac{2k^2}{n_0} \frac{\partial n}{\partial T} T E,$$

где $E(x, y, z)$ – комплексная амплитуда поля, z – координата, положительное направление которой совпадает с направлением распространения излучения, x и y – координаты в поперечной плоскости; $\Delta_{\perp} = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ – оператор Лапласа; k – волновое число; n_0 – невозмущенное значение показателя преломления; T – температура среды. Длина трассы во всех численных экспериментах была нормирована на дифракционную длину $Z_d = ka_0^2$, a_0 – начальный радиус субапертуры системы.

Для учета теплового самовоздействия было введено материальное уравнение, описывающее процесс нагрева атмосферы пучком:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V_{\perp} \nabla_{\perp}) T = \frac{\alpha I}{\rho C_p}.$$

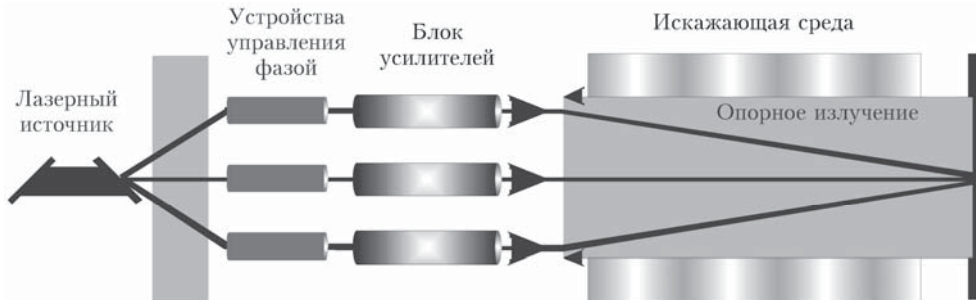


Рис. 1. Схема многоканальной оптической системы с замкнутой обратной связью

Здесь V_{\perp} – скорость потока среды, поперечного по отношению к трассе распространения пучка (скалярная величина); t – время; α – коэффициент поглощения; I – интенсивность излучения; ρ – плотность среды. Тепловые искажения характеризовались параметром нелинейности

$$R_v = \frac{2k^2 a_0^3 \alpha I_0}{n_0 \rho C_p V_{\perp}} \frac{\partial n}{\partial T},$$

пропорциональным интенсивности пучка в плоскости апертуры источника I_0 и начальному радиусу a_0 , возведенному в третью степень; C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Совместное решение уравнения квазиоптики и материального уравнения выполнялось на основе алгоритма расщепления по физическим факторам [13], согласно которому среда была представлена набором фазовых экранов и участков свободной дифракции между ними. В качестве характеристики поля в плоскости наблюдения использовался критерий фокусировки, задаваемый формулой

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

В данном выражении P_0 – полная мощность излучения; $\sigma(x, y)$ – апертурная функция, равная единице в пределах апертуры приемника и нулю за ее пределами. С введением нормировки увеличение числа пучков не приводит к увеличению критерия $J(t)$. При выполнении исследований ожидалось, что неравномерное распределение интенсивности на объекте может привести к появлению зависимости критерия $J(t)$ от размеров апертуры устройства регистрации. Поэтому критерий вычислялся в апертурах различных размеров.

2. Влияние тепловых искажений на качество многоканального излучения

Типичные тепловые искажения многоканального излучения показаны на рис. 2. Основным отличием тепловой линзы (рис. 2, б) от характерного для гауссова пучка распределения температуры является наличие мелкомасштабной структуры, что приводит к большей изрезанности амплитуды на объекте фокусировки.

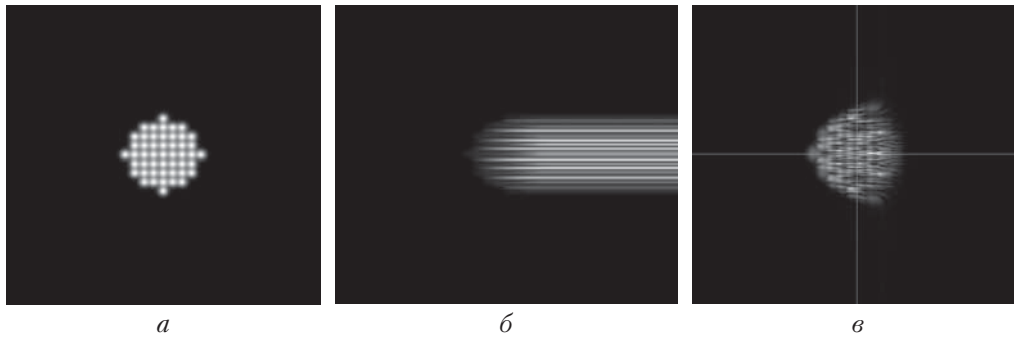


Рис. 2. Амплитудное распределение многоканального излучения в плоскости излучающей апертуры (*a*) и на объекте фокусировки (*в*), а также наведенная излучением тепловая линза (*б*)

Значения критерия фокусировки (1), регистрируемые в различных сечениях трассы распространения при различных значениях параметра нелинейности R_v , представлены на рис. 3. Можно отметить следующие особенности изменения указанного параметра: критерий убывает почти как экспоненциальная функция с возрастанием пройденного пучком расстояния; с увеличением модуля R_v спад критерия наблюдается на меньших дистанциях.

3. Адаптивное управление излучением на основе алгоритма фазового сопряжения

Для компенсации тепловых искажений был использован алгоритм фазового сопряжения. Результаты коррекции иллюстрируются на рис. 4, где представлены изменения критерия в процессе управления.

На нулевой итерации значения параметра соответствуют плоскому фазовому профилю излучения (управление отсутствует). Графики показывают, что при небольшой мощности ($R_v = -5$) значения критерия, регистрируемые в апертурах приемника с радиусами, равными 5-ти и 10-ти исходным радиусам элементарного пучка, возрастают на нескольких начальных итерациях (рис. 4, *a*, кривые 2 и 3), а дальше практически не изменяются при всех значениях апертуры. Это означает, что концентрация светового поля увеличивается в центральной области без фокусировки всего пучка как целого. Рост мощности и соответствующий рост модуля параметра нелинейности приводят к незатухающим осцилляциям критерия (рис. 4, *б, в*), наблюдаемым для всего набора выбранных апертур приемника. В целом можно заключить, что использование фазового сопряжения для компенсации самовоздействия увеличивает критерий фокусировки незначительно (если мощность излучения невелика) или не меняет его.

4. Амплитудно-фазовая коррекция тепловых искажений излучения

Дополнительное, по сравнению с фазовым сопряжением, увеличение концентрации светового поля на объекте фокусировки можно обеспечить при переходе к амплитудно-фазовому управлению волновым

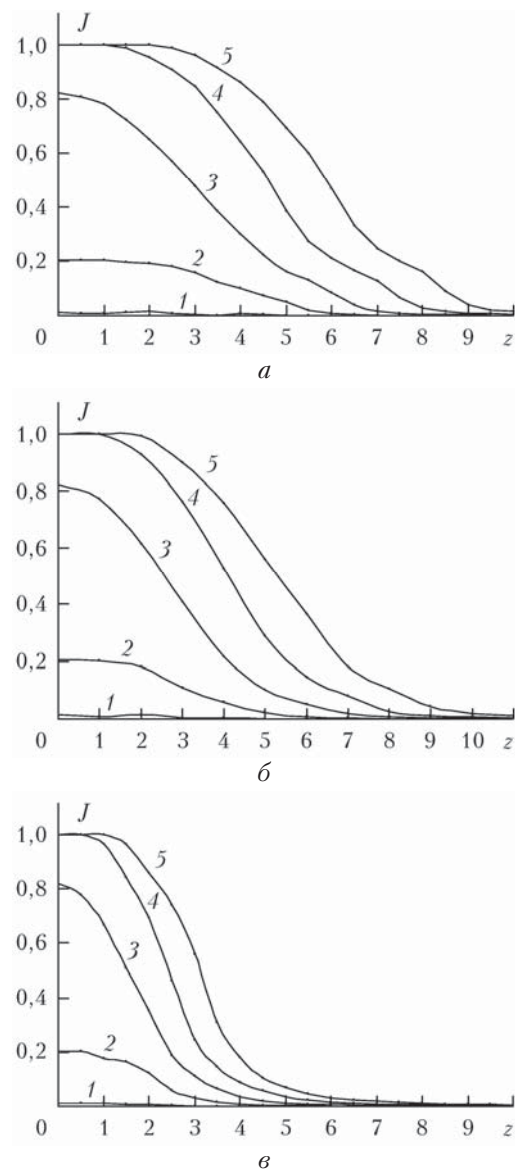


Рис. 3. Зависимость критерия фокусировки от пройденного пучком расстояния, регистрируемого в апертуре с радиусом, равным: одному начальному радиусу элементарного пучка, формирующего многоканальное излучение (кривая 1), пяти (2), десяти (3), пятнадцати (4) и двадцати радиусам (5); параметр нелинейности $R_v = -5$ (*a*), -10 (*б*), -15 (*в*)

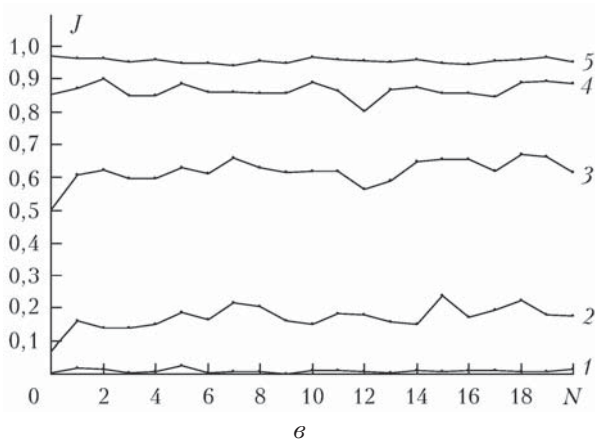
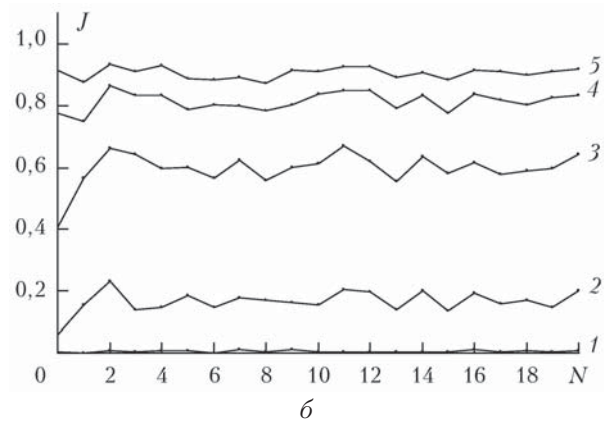
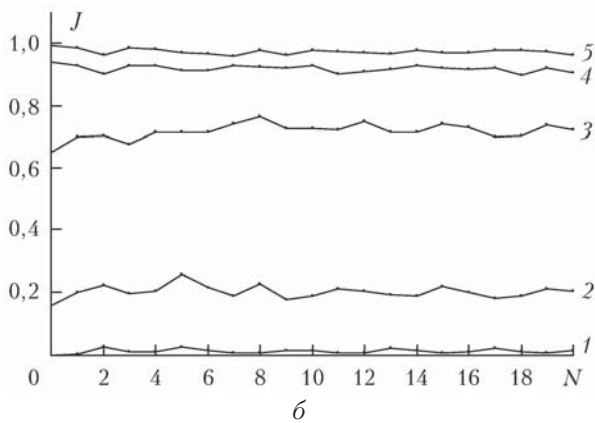
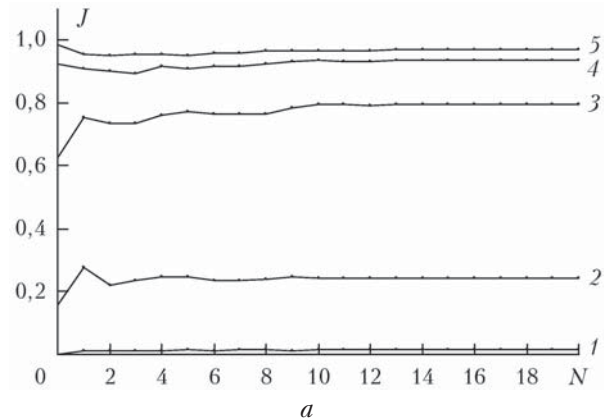
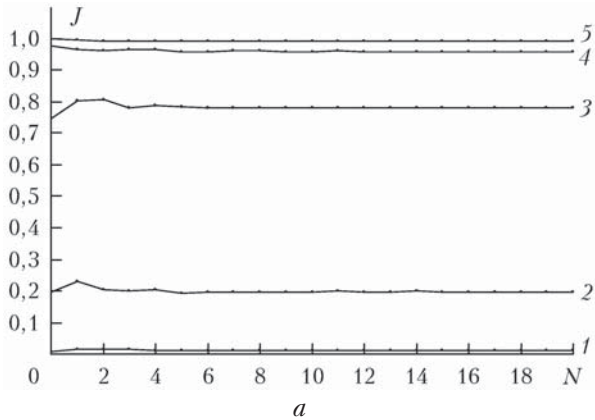


Рис. 4. Изменение критерия фокусировки в процессе адаптивного управления пучком, реализованного на основе алгоритма фазового сопряжения: $R_v = -5$ (а), -10 (б), -20 (в); $z = 3$; N – номер итерации. Номера кривых соответствуют рис. 3

фронтом [14, 15]. Результаты применения алгоритма показаны на рис. 5. Так, в умеренно нелинейной среде наблюдается увеличение плотности мощности приблизительно на 30% в центральной области пучка (рис. 5, а, кривые 2 и 3). В отличие от численного эксперимента, в котором управление осуществлялось на основе фазового сопряжения, в рассматриваемой ситуации колебания критерия имеют небольшую амплитуду и быстро затухают.

Увеличение интенсивности излучения (рис. 5, б) приводит к развитию незатухающих колебаний кри-

Рис. 5. Изменения критерия фокусировки при амплитудно-фазовом управлении: $R_v = -10$ (а) и -20 (б). Номера кривых соответствуют рис. 3

терия при управлении, хотя на начальных итерациях наблюдается рост указанного параметра при регистрации его в центральной области.

Заключение

Применение фазового сопряжения для компенсации теплового самовоздействия многоканального излучения целесообразно только при небольшой интенсивности искажений ($R_v = -5$). Критерий фокусировки в этом случае увеличивается примерно на 10% и только в центральной области пучка. Рост интенсивности излучения приводит к незатухающим осцилляциям критерия.

Устойчивость адаптивного управления может быть повышена при переходе к амплитудно-фазовому управлению волновым фронтом. Применение алгоритма обеспечивает рост критерия до 30% при параметре нелинейности $R_v = -10$. При дальнейшем увеличении мощности также развиваются незатухающие осцилляции критерия.

Настоящее исследование было поддержано РФФИ (грант № 16-45-700876).

1. Bruesselbach H., Wang Sh., Minden M., Jones D.C., Mangir M. Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. V. 22, N 2. P. 347–354.

2. Fotiadi A.A., Zakharov N., Antipov O.L., Mégret P. All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 22. P. 3574–3576.
3. Fan T.Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 2005. V. 11, N 3. P. 567–572.
4. Grime B.W., Roh W.B., Alley Th.G. Phasing of a two-channel continuous-wave master oscillator-power amplifier by use of a fiber phase-conjugate mirror // Opt. Lett. 2005. V. 30, N 18. P. 2415–2417.
5. Fan X., Liu J., Liu J., Wu J. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // Chin. Opt. Lett. 2010. V. 8, N 1. P. 48–51.
6. Bellanger C. Coherent fiber combining by digital holography // Opt. Lett. 2008. V. 33, N 24. P. 2937–2939.
7. Vorontsov M.A., Lachinova S.I. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic consideration for analysis // J. Opt. Soc. Am. A. 2008. V. 25, N 8. P. 1949–1959.
8. Vorontsov M.A., Lachinova S.I. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. II. Analysis of atmospheric compensation efficiency // J. Opt. Soc. Am. A. 2008. V. 25, N 8. P. 1960–1973.
9. Банах В.А., Фалиц А.В. Оценка эффективности фокусировки многоэлементного пучка в условиях теплового самовоздействия // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 11–17; Banakh V.A., Falits A.V. Assessment of multielement beam focusing under conditions of thermal blooming // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 3. P. 211–217.
10. Банах В.А., Фалиц А.В. Численное моделирование распространения лазерных пучков, формируемых многоэлементными апертурами, в турбулентной атмосфере при тепловом самовоздействии // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 26, № 5. С. 371–380.
11. Weyrauch T., Vorontsov M.A., Carhart G.W., Beresnev L.A., Rostov A.P., Polnau E.E., Liu J.J. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path // Opt. Lett. 2011. V. 36, N 22. P. 4455–4457.
12. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
13. Марчук Г.И. Алгоритмы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.
14. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А., Моисей Е.И. Новый алгоритм формирования амплитудного профиля излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 368–374.
15. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 254 с.

F.Yu. Kanev, N.A. Makenova, V.P. Lukin, O.L. Antipov, I.D. Veretekhin. Adaptive compensation of thermal distortions of multichannel laser radiation.

Results of simulation of multichannel radiation propagation under conditions of thermal blooming are presented and correction of nonlinear thermal distortion on the base of the beam phase control is considered. The results show the dependence of correction effectiveness on the number of channels and on the precision of reference beam phase retrieval. An additional increase in the effectiveness is possible with adjustment of amplification in the channels of the optical system, i.e., with the use of amplitude-phase control of radiation.