

В.П. Кандидов, Д.П. Криндач, О.А. Митрофанов, В.В. Попов, Ю.С. Соляник

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования компенсации нелинейных искажений при адаптивном управлении фазой светового пучка в базисе первичных волновых aberrаций. Показано, что при модальном управлении фазой достигается существенное улучшение пространственной локализации энергии излучения в широком диапазоне изменения физических параметров. Экспериментально подтверждена применимость теории подобия, развитой в нелинейной оптике.

1. Введение

В адаптивной оптике все большее распространение получает принцип модального формирования фазы светового пучка. Основанием к развитию этого подхода являются результаты теоретического исследования модового состава фазовых искажений оптического излучения в нелинейных и случайно-неоднородных средах, успехи в создании датчиков и корректоров волнового фронта, в разработке алгоритмов адаптивного управления. Так, при стационарной ветровой рефракции светового пучка наиболее низкопороговом нелинейном эффекте в атмосфере — основной вклад в искажения фазы вносят низшие aberrации [1, 2]. Возмущения фазы в турбулентной атмосфере представимы в виде разложения по базису функций Карунена-Лоэва или полиномов Цернике [3]. Коэффициенты разложения по полиномам Цернике быстро убывают и становятся пренебрежимо малыми, начиная с третьей степени. Поэтому формирование фазы пучка в виде суперпозиции базисных мод имеет неоспоримое преимущество, так как существенно уменьшает число каналов управления и, следовательно, повышает устойчивость адаптивной системы. Одновременно модальный подход позволяет контролировать точность коррекции фазовых искажений.

В настоящее время разработаны различные типы корректоров волнового фронта, предназначенные для модального формирования фазы светового пучка. Наиболее перспективными из них являются корректоры с нелокальной функцией отклика. Так, для биморфных зеркал с 13 приводами получены прогибы отражающей поверхности, совпадающие с первыми полиномами Цернике с точностью до 10%. При этом чувствительность составляет 0,03 мкм/в [4]. Гибкое зеркало с шестью электромеханическими приводами на его контуре воспроизводит первые пять полиномов Цернике с точностью до 20% при диапазоне перемещения отражающей поверхности до 300 мкм [5]. Очевидно, что модальное формирование фазы пучка осуществимо и на корректоре с локальной функцией отклика при достаточно большом числе приводов (несколько десятков).

В системах модального управления наиболее предпочтительно использование датчиков волнового фронта, которые дают информацию о модовом составе искаженной волны [6]. Для организации работы адаптивной системы созданы алгоритмы, функционирующие в пространстве базисных мод. Один из таких алгоритмов использует многокритериальный подход, позволяющий в значительной мере расцепить каналы модального управления и тем самым повысить устойчивость работы системы в условиях естественных шумов [7].

Несмотря на значительные успехи в разработке составных элементов систем адаптивной оптики, сравнительно мало исследований выполнено на действующих установках [8].

Настоящая статья посвящена исследованию адаптивной системы модального управления, ориентированной на компенсацию нелинейных фазовых искажений при распространении лазерного излучения в поглощающей среде. Основная цель исследований состоит в количественном измерении эффективности модального управления по низшим aberrациям для пространственной локализации излучения в условиях ветровой рефракции. Статья является продолжением и обобщением цикла исследований, представленных в [7, 9, 10].

2. Анализ многокритериального алгоритма коррекции ветровой рефракции

Основная идея многокритериального алгоритма заключается в организации адаптивного управления на основе оптимизации совокупности скалярных критериев, каждый из которых характеризует качество компенсации по соответствующей базисной моде корректора. В результате такого подхода устраняется перекрестная связь между различными каналами управления, что, в свою очередь, приводит к возрастанию скорости сходимости и устойчивости итерационного процесса управления. Как показывает анализ, проведенный для случая линейной и однородной среды распространения [9], при управлении фазой светового пучка в базисе низших оптических aberrаций, описываемых первыми

пятью полиномами Цернике (наклоны, осесимметричная фокусировка и астигматизмы), в качестве критериев качества можно использовать следующие функционалы распределения интенсивности пучка $I(x, y, z_0)$ в плоскости фокусировки z_0 :

$$\begin{aligned}\hat{F}_1[I] &= M\{x\} = x_{ц}; \quad \hat{F}_2[I] = M\{y\} = y_{ц}; \\ \hat{F}_{3,4}[I] &= M\{x-x_{ц}\}^2 \pm (y-y_{ц})^2 = a_x^2 \pm a_y^2; \\ \hat{F}_5[I] &= M\{(x-x_{ц})(y-y_{ц})\} = a_{xy},\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$M\{f(x, y)\} = \iint f(x, y) I(x, y, z_0) dx dy / \iint I(x, y, z_0) dx dy.$$

Величины $x_{ц}$, $y_{ц}$ имеют смысл координат энергетического центра тяжести, a_x , a_y — эффективных размеров светового пучка в поперечном сечении. Функционалы \hat{F}_1, \hat{F}_2 определяют положение энергетического центра тяжести пучка, \hat{F}_3 — фокусировку, \hat{F}_4, \hat{F}_5 — округлость изображения пучка, связанную с астигматизмами волнового фронта.

Поскольку эти функционалы не обеспечивают полного расщепления каналов, то для увеличения устойчивости итерационного процесса управления в эксперименте [9] использовалась последовательная компенсация aberrаций.

При распространении указанного подхода на задачи управления фазой светового пучка в нелинейной среде следует учитывать возникновение дополнительной взаимосвязи различных каналов управления [10]. В нелинейных средах нарушается принцип суперпозиции, и при управлении по некоторому каналу происходит изменение всех функционалов интенсивности (1). Следствием этого может являться замедление, а при сильных нелинейностях и срыв сходимости итерационного процесса фокусировки. В связи с этим важное значение приобретает задача теоретического исследования адаптивного управления фазой светового пучка в нелинейной среде на основе многокритериального алгоритма.

Основные закономерности многокритериального управления фазой в базе низших оптических aberrаций (до второго порядка включительно) могут быть исследованы в рамках безабберационного приближения. В этом приближении световое поле при стационарной ветровой рефракции представляется в виде гауссоподобного пучка, фаза которого описывается полиномом второй степени:

$$\begin{aligned}E(x, y, z) &= A(z) \exp\left\{-\frac{(x-r(z))^2}{2a^2(z)} - \frac{y^2}{2b^2(z)}\right\} \exp\{i\varphi(x, y, z)\}; \\ \varphi(x, y, z) &= \kappa\left\{\theta(z)(x-r(z)) + \frac{S_x}{2}(x-r(z))^2 + \frac{S_y}{2}y^2\right\},\end{aligned}\tag{2}$$

где $\theta(z)$, $S_x(z)$, $S_y(z)$ — угол наклона и значения кривизны волнового фронта, $a(z)$, $b(z)$, $r(z)$ — эффективные размеры и смещение энергетического центра тяжести пучка. Направление скорости ветра совпадает с осью OX .

На передающей апертуре фаза пучка $\varphi(x, y, 0)$ формируется в виде суперпозиции базисных мод, воспроизводимых корректором волнового фронта. Для гибкого управляемого зеркала, прогиб отражающей поверхности которого характеризуется модами $w_j(x, y)$, фаза $\varphi(x, y, 0)$ равна

$$\varphi(x, y, 0) = 2\kappa \sum_{j=1}^5 U_j w_j(x, y),\tag{3}$$

U_j — координаты управления. Если в качестве модального базиса выбраны полиномы Цернике, то координаты управления связаны с коэффициентами разложения фазы (2) в плоскости $z = 0$ следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}U_1 &= \theta(0); \quad U_3 = \frac{S_x(0) + S_y(0)}{2}; \\ U_4 &= \frac{S_x(0) - S_y(0)}{2}.\end{aligned}\tag{4}$$

Критериями подобия задачи управления фазой светового пучка при стационарной ветровой рефракции являются следующие величины [11]: $z/\kappa a_0^2$ — длина трассы в дифракционных длинах;

$\alpha n_0 k a_0^2$ — оптическая толщина на дифракционной длине; $R_v = \frac{2\kappa^2 \alpha n_0 a_0}{\pi c_{\rho\rho}} \frac{\partial n}{\partial T} \frac{P_0}{V}$ — параметр нелинейности; $U_1 k a_0$, $U_3 k a_0^2$, $U_4 k a_0^2$ — безразмерные координаты управления наклоном, фокусировкой и астигматизмом волнового фронта.

Для определения параметров пучка (2) на трассе была получена система обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью вариационного подхода [12]. В результате решения этой системы для ряда координат управления (U_3 , U_4) найдены значения функционалов \hat{F}_3 , \hat{F}_4 , характеризующих пространственную локализацию излучения при различных условиях распространения.

Характер и степень влияния нелинейного взаимодействия поля и среды на процесс многокритериального управления наглядно проявляется при исследовании топологии функционалов \hat{F}_3 (фокусировка) и \hat{F}_4 (астигматизм). На рис. 1 показаны координаты минимума функционала \hat{F}_3 и линии нулевого уровня функционала \hat{F}_4 на плоскости модального управления (U_3 , U_4) для ряда значений параметра нелинейности R_v . В линейном случае положения минимума функционала \hat{F}_3 и нулевого значения функционала \hat{F}_4 совпадают (точки $U_3 = 2,0$, $U_4 = 0,0$ на рис. 1). Это позволяет получить в процессе управления максимально сфокусированный осесимметричный пучок.

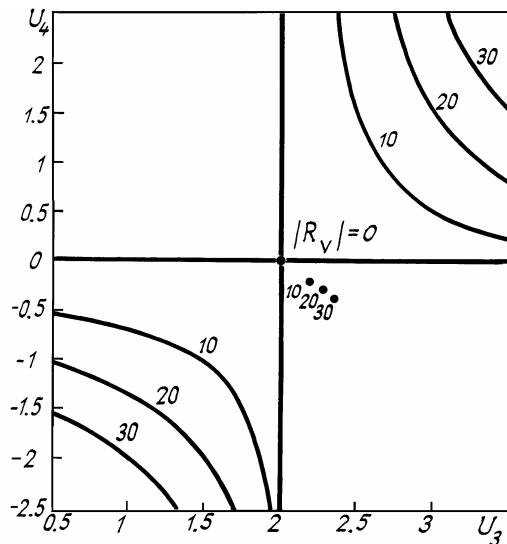


Рис. 1. Координаты минимума функционала фокусировки \hat{F}_3 и линии нулевого значения функционала астигматизма \hat{F}_4 на плоскости модального управления (U_3 , U_4) при различных значениях параметра нелинейности R_v . Длина трассы $z = 0,5\kappa a_0^2$

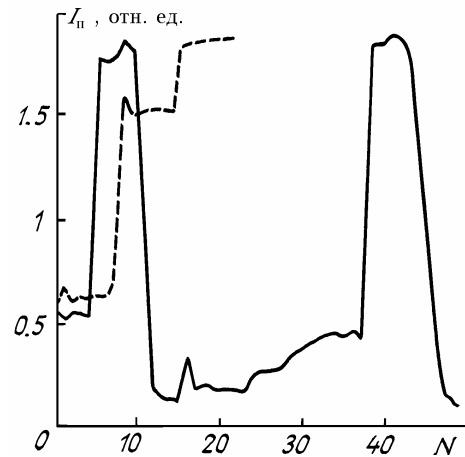


Рис. 2. Изменение пиковой интенсивности пучка I_n при управлении на основе многокритериального алгоритма (сплошная линия) и при градиентной оптимизации одного скалярного критерия \hat{F}_3 (штриховая). $|R_v| = 14$, $z = 0,5\kappa a_0^2$, N — номер итерации

С ростом нелинейности происходит расщепление точек экстремума в пространстве координат управления (U_3 , U_4). А именно, если начальный фазовый профиль на передающей апертуре обеспечивает минимум функционала фокусировки, то отсутствует осевая симметрия изображения пучка ($F_4 \neq 0$). Наоборот, если пучок приобретает осесимметричную форму при координатах (U_3 , U_4), принадлежащих линии нулевого значения функционала \hat{F}_4 , то эффективный радиус пучка становится больше минимально достижимого значения. Отсюда следует, что адаптивное управление фазой светового пучка в нелинейной среде на основе многокритериального алгоритма с последовательной коррекцией сначала астигматизма U_4 , затем фокусировки U_3 может привести к осцилляциям характеристик поля во времени. Вышесказанное иллюстрируется рис. 2, на котором представлено изменение в процессе управления пиковой интенсивности пучка в плоскости фокусировки при многокритериальном управлении и при градиентной оптимизации одного скалярного критерия \hat{F}_3 . При этом многокритериальное управление обеспечивает более высокую скорость достижения области максимальных значений пиковой интенсивности по сравнению с однокритериальным при любом коэффициенте усиления в цепи обратной связи (величине градиентного шага).

Однако в лабораторных экспериментах, результаты которых представлены в [10] и настоящей статье, не зарегистрировано срывов адаптивного управления после достижения области оптимальной

компенсации нелинейных искажений. Это может объясняться тем, что градиент функционала астigmatизма $|\hat{F}_4|$ в области оптимальной компенсации в реальном эксперименте не выделяется на фоне шумов канала регистрации вследствие его малой величины.

3. Экспериментальные исследования эффективности модального управления

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном макете адаптивной оптической системы, описанном в [9]. Основным элементом макета является гибкое управляемое зеркало, с удовлетворительной точностью воспроизводящее модальный базис из пяти первых полиномов Цернике [5].

Распространение лазерного излучения в условиях ветровой рефракции моделировалось с помощью вращающейся вертикально расположенной кюветы, заполненной спиртовым раствором фуксина (длина кюветы 0,7 м, коэффициент поглощения раствора $1,0 \text{ м}^{-1}$).

Количественные измерения параметров пучка в процессе управления осуществлялись с помощью разработанной системы регистрации, которая включает стандартную телекамеру, сопряженную с ЭВМ [13]. Регистрировалось изображение пучка в плоскости, находящейся на расстоянии 12 м от выходного окна кюветы, что соответствовало дальней зоне. В ЭВМ по изображению пучка вычислялись его интегральные характеристики, необходимые для организации адаптивного управления. Процесс управления осуществлялся на основе многокритериального алгоритма коррекции аберраций [10].

Эксперименты проводились с излучением ТЕМ₀₀ моды аргонового лазера. Длина волны излучения $\lambda = 0,488 \text{ мкм}$, радиус пучка на входе в среду $a_0 = 1,2 \text{ мм}$.

В данной статье представлены результаты трех серий экспериментов по адаптивной компенсации искажений, вызванных ветровой рефракцией с различной скоростью потока ($v = 1,1; 2,0; 3,0 \text{ мм/с}$). В каждой серии проводились измерения при различном значении входной мощности излучения ($P = 0; 200 \text{ мВт}$). Так как одно и то же значение безразмерного параметра R_v достигается при различных значениях скорости v и мощности P , то результаты каждой серии представлены в зависимости от R_v .

а). *Эффективные размеры пучка.* Эффективные радиусы пучка в параллельном a_x и перпендикулярном a_y потоку направлениях вычислялись по изображению пучка в соответствии с формулами (1). Для измерений в дальней зоне эффективные радиусы пучка определяют его угловую расходимость.

На рис. 3, а представлена зависимость эффективных размеров пучка от параметра нелинейности R_v , полученная при выключенной и включенной системе адаптивного управления.

Прежде всего необходимо отметить удовлетворительное совпадение экспериментальных точек, полученных при различных физических параметрах скорости v и мощности P , но соответствующих одному значению безразмерного параметра нелинейности R_v . Это подтверждает применимость аппарата теории подобия для интерпретации результатов лабораторного моделирования распространения и адаптивного управления фазой интенсивного лазерного излучения в атмосфере.

Большое отличие эффективных размеров пучка в направлениях вдоль и поперек потока в отсутствие управления является характерной особенностью проявления анизотропии тепловой линзы, наведенной пучком в движущейся среде. Как видно из рисунка, в процессе управления по базисным модам фокусировки и астigmatизма удается существенно уменьшить эффективные размеры пучка в дальней зоне. В результате управления угловая расходимость пучка в плоскости, перпендикулярной потоку, становится близкой к расходимости в плоскости, параллельной потоку.

Для количественной оценки эффективности управления удобно ввести величину η , определяемую формулой:

$$\eta = \frac{a_{x,y}^0 - a_{x,y}^A}{a_{x,y}^0 - a_d}, \quad (5)$$

где $a_{x,y}^0$ — радиусы пучка до управления; $a_{x,y}^A$ — после управления; a_d — дифракционно ограниченный радиус пучка в отсутствие нелинейности. Параметр η характеризует отношение уменьшения размера пучка после управления к отклонению этого размера от дифракционно ограниченного в отсутствие управления. Таким образом, величина η определяет относительную часть достигнутого улучшения качества пучка. При $\eta = 0$ параметры пучка не меняются при управлении, при $\eta = 1$ достигается полная компенсация и его размеры a_{xy}^A совпадают с дифракционно ограниченными a_d , при $\eta < 0$ управление ухудшает параметры пучка.

Зависимость η от параметра нелинейности, приведенная на рис. 3, б, показывает, что эффективность управления в направлении поперек ветрового потока всегда несколько выше эффективности управления вдоль по потоку. Пучок, сформированный в результате коррекции, приобретает более осесимметричную форму и величины a_x^A и a_y^A близки друг к другу.

С ростом $|R_v|$ эффективность управления уменьшается вследствие нарастания амплитудных возмущений и нарушения принципа аддитивности нелинейных и корректирующих аберраций фазы. Причина уменьшения эффективности управления в области низких нелинейностей носит иной характер и

обусловлена техническими характеристиками конструкции приводов используемого адаптивного зеркала. Нелинейный фазовый набег, оцениваемый в приближении заданного поля, при параметре нелинейности $|R_v| \sim 10^2$ составляет $\varphi_{нл} \sim |R_v| z \sim 10$ рад. При точности позиционирования поверхности фазового корректора порядка $0,7\lambda$ относительная локальная погрешность получения требуемого профиля фазы может достигать 50%.

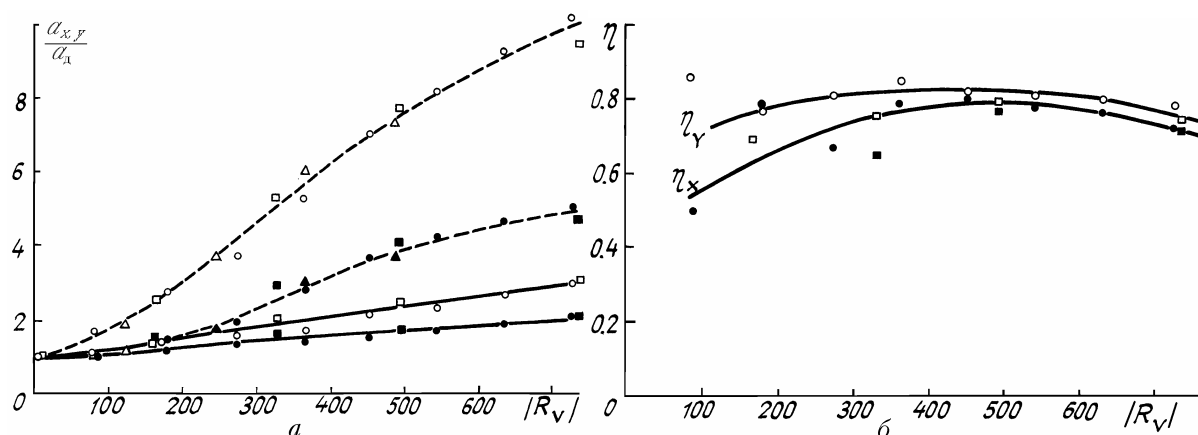


Рис. 3. Эффективные размеры пучка a_x (темные) и a_y (светлые фигуры); светлые и темные квадраты — $v = 1,1$ мм/с; светлые и темные кружки — $v = 2$ мм/с; $v = 3$ мм/с — светлые и темные треугольники; (штриховые — без управления; сплошные кривые — после управления): (а) зависимость эффективных размеров от параметра нелинейности R_v ; (б) зависимость эффективности управления η от параметра нелинейности R_v

Таким образом, введенный параметр η характеризует как принципиальную возможность компенсации нелинейных искажений при больших параметрах $|R_v|$, так и качество работы конкретной адаптивной системы.

б). *Пространственная локализация энергии.* В связи с проблемой транспортировки энергии лазерного излучения в атмосфере представляет интерес изменение пространственной локализации светового поля при адаптивном управлении. Для количественной оценки пространственной локализации излучения рассмотрим нормированную мощность $W(a_w)$, приходящуюся на круговую апертуру радиуса a_w в плоскости наблюдения z_0 . Поскольку при ветровой рефракции в распределении интенсивности пучка появляется ряд экстремумов, то выбор центра круговой апертуры не однозначен (рис. 4, а). В проведенных измерениях центр апертуры совпал с энергетическим центром пучка ($x_{ц}$, $y_{ц}$). Нормированная мощность $W(a_w)$ определяется выражением

$$W(a_w) = \iint_S I(x, y, z_0) dx dy / P, \quad (6)$$

где S — апертура приемника; P — мощность пучка.

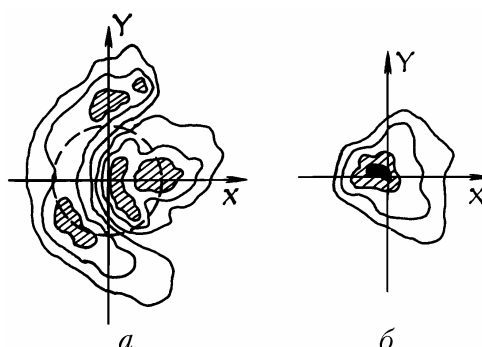


Рис. 4. Изофоты распределения интенсивности в поперечном сечении пучка в дальней зоне при $|R_v| = 640$: (а) в отсутствие управления, (б) после управления. Начало координат совпадает с энергетическим центром пучка ($x_{ц}$, $y_{ц}$). Пунктиром обозначена апертура приемника

Нормированная мощность $W(a_w)$ рассчитывалась по оцифрованным изображениям пучка, зарегистрированным без управления и после включения адаптивной системы. Точность регистрации изо-

бражения ограничивается динамическим диапазоном телекамеры, который составляет 30–40 дБ. При таком диапазоне невозможно воспроизвести полностью изменение интенсивности в сечении пучка. При измерениях телекамера настраивалась на воспроизведение максимума плотности мощности, что приводило к отсеканию в изображении пучка пьедестала с низкой интенсивностью. Тем самым завышалась оценка пространственной локализуемости энергии. Для исключения этих погрешностей одновременно проводились измерения мощности $W(a_w)$ с помощью измерителя мощности (ИМО), оснащенного диафрагмой переменного радиуса. Ограниченная апертура ИМО не позволяла измерять мощность $W(a_w)$ в отсутствие управления, когда велика пространственная делокализация излучения.

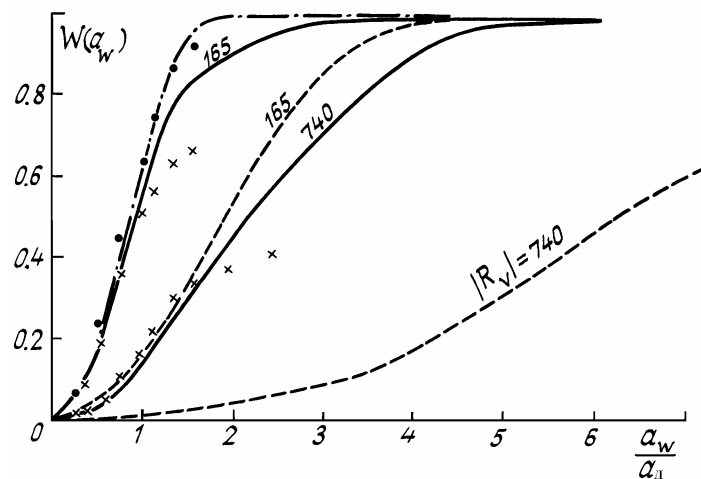


Рис. 5. Нормированная мощность $W(a_w)$ в зависимости от радиуса апертуры приемника a_w . a_d — дифракционный радиус гауссовского пучка. Данные, полученные по оцифрованному изображению: штрихпунктирная — линейный случай ($R_v = 0$), штриховые — в отсутствие управления, сплошные линии — после управления. Данные ИМО: точки — линейный случай, крестики — после управления

На рис. 5 при двух значениях параметра нелинейности изображена зависимость нормированной мощности $W(a_w)$ от радиуса апертуры приемника a_w . Кривые построены по оцифрованным изображениям, точки и крестики соответствуют показаниям ИМО.

В отсутствие управления ветровая рефракция вызывает искажения диаграммы направленности. Появляются локальные максимумы в распределении интенсивности, что ухудшает пространственную локализацию энергии. В результате при заданном радиусе апертуры уровень мощности, попадающей в нее, уменьшается с ростом параметра нелинейности $|R_v|$ (рис. 5).

Фазовая коррекция низших оптических аберраций позволяет существенно улучшить пространственную локализацию энергии практически во всем диапазоне рассматриваемых параметров нелинейности R_v . Доля мощности, попадающей в заданную апертуру, резко возрастает. Это объясняется тем, что в процессе управления формируется единственный ярко выраженный максимум, содержащий основную долю мощности пучка (рис. 4, б).

Для количественной меры пространственной локализации можно ввести энергетический радиус пучка a_w . Он равен радиусу апертуры, в которую попадает заданная часть полной мощности пучка. Если эта часть составляет 63%, то a_w для гауссовского пучка совпадает с его дифракционным радиусом a_d .

Изменение энергетического радиуса пучка a_w по уровню 63% в зависимости от параметра нелинейности R_v приведено на рис. 6, а. В результате управления энергетический радиус пучка сокращается в несколько раз.

Для оценки эффективности пространственной локализации энергии при управлении удобно ввести величину η_w , аналогичную η . Зависимость $\eta_w(R_v)$ приведена на рис. 6, б для двух уровней (63% и 30%) принимаемой мощности. Видно, что энергетическая эффективность управления довольно высока и составляет $\sim 0,8$ в диапазоне $|R_v| \sim 300\div 600$.

Из приведенных результатов следует, что при большой нелинейности ($|R_v| \lesssim 500$) эффективность управления, оцениваемая по уровню 0,63, несколько ниже, чем по уровню 0,30. Это объясняется тем, что при управлении по низшим аберрациям формируется узкий керн с высокой плотностью мощности на фоне широкого пьедестала. Как показывают наблюдения, в процессе управления пространственные масштабы пьедестала низкой интенсивности практически не меняются.

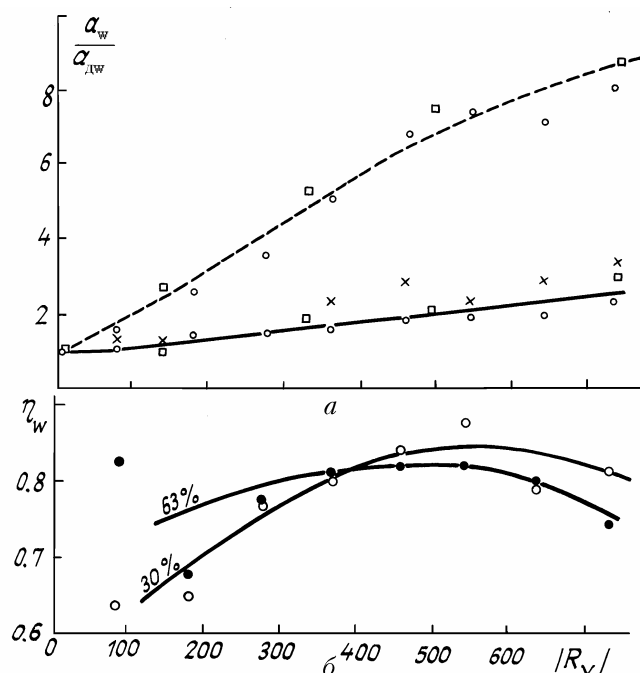


Рис. 6. Энергетический радиус пучка a_w . (а) Энергетический радиус a_w по уровню 63% полной мощности в зависимости от R_v . Светлые кружки и крестики — скорость потока $v = 2$ мм/с; квадратики — $v = 1,1$ мм/с; штриховые линии — в отсутствие управления; сплошные линии — после управления. Данные получены: светлые кружки и квадраты — по оцифрованному изображению; крестики — по ИМО. (б) Энергетическая эффективность управления η_w в зависимости от параметра нелинейности R_v по уровням 63% и 30% полной мощности при скорости потока $v = 2$ мм/с

4. Выводы

Экспериментально установлена высокая эффективность модального управления абберациями фазы первого и второго порядков для компенсации ветровой рефракции пучка. При управлении поперечные размеры пучка сокращаются более чем в два раза в направлении вдоль по потоку и более чем в три раза в направлении, поперечном потоку. Изображение пучка становится близким к осесимметричному.

Величина эффективности управления, введенная как относительное сокращение поперечных размеров пучка, составляет 60–70% при изменении параметров нелинейности в диапазоне $|R_v| \sim 200-700$ при наблюдении в дальней зоне. Эффективность пространственной локализации энергии излучения по уровню 63% от полной мощности достигает 80%.

Подтверждена применимость критериев теории подобия в нелинейной оптике для интерпретации результатов экспериментального исследования адаптивных систем. Параметр нелинейности R_v однозначно определяет искажения при ветровой рефракции на трассе заданной длины.

В условиях нелинейности возникает связь каналов управления в адаптивной оптической системе и использование многокритериального алгоритма теоретически должно приводить к срыву процесса коррекции. На практике многокритериальный алгоритм модального управления в условиях реальных помех обеспечивает устойчивую сходимость итерационного процесса адаптивной коррекции фазовых искажений.

1. Nahrstedt D. A. // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 2. P. 224–252.
2. Чесноков С. С. // Квантовая электроника. 1983. Т. 110. № 4. С. 1160–1165.
3. Wang G. Y., Markey J. K. // J. Opt. Soc. Amer. 1978. V. 68. № 1. P. 78–87.
4. Воронцов М. А., Гнедой С. А., Кудряшов А. В. и др. // Управляемые зеркала на основе полупассивных биморфных пьезоэлементов. Шатура, 1987. 22 с.
5. Кандидов В. П., Кудряшов А. В., Ларионова И. В., Попов В. В., Чистяков И. М. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 6. С. 801–804.
6. Аксенов В. П., Исаев Ю. Н. // Тез. докл. II Всесоюз. симп. по распротр. лазер, изл. в атм. и водн. средах. Томск, 1991. С. 135.
7. Кандидов В. П., Митрофанов О. А., Попов В. В. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 8. С. 1548–1550.
8. Адаптивная оптика/Под ред. Э.А. Витриченко. М.: Мир, 1980. 456 с.
9. Кандидов В. П., Криндач Д. П., Митрофанов О. А., Попов В. В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1187–1194.

10. Кандидов В.П., Криндач Д.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 12. С. 1286–1293.
11. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П. и др. //Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 1. С. 1–37.
12. Воробьев В.В. Тепловое самовоздействие лазерного излучения в атмосфере. М.: Наука, 1987. 199 с.
13. Митрофанов О.А., Попов В.В. //ПТЭ. 1989. № 5. С. 249.

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
2 октября 1991 г.

V.P. Kandidov, D.P. Krindach, O.A. Mitrofanov, V.V. Popov, Yu.S. Solyanik. **Efficiency of Modal Control of Laser Beam Phase.**

The results of theoretical and experimental investigations of a nonlinear distortion compensation using the adaptive light beam phase control on the basis of lowest optical aberrations are presented. It is shown that the modal phase control significantly improves spatial localization of light energy in a wide region of physical parameters. The similarity theory for nonlinear optics is experimentally confirmed.