

В.П. Кандидов, Д.П. Криндач, О.А. Митрофанов, В.В. Попов

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ТЕПЛОВОМ САМОВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТОВОГО ПУЧКА

Приводятся результаты лабораторного исследования адаптивной фокусировки лазерного пучка, распространяющегося в условиях ветровой рефракции. Используется многокритериальный алгоритм модальной коррекции фазы пучка. Продемонстрирована высокая скорость и устойчивость итерационного процесса управления.

Развитие адаптивной оптики во многом определяет прогресс в повышении эффективности современных лазерных систем. В настоящее время достигнуты значительные успехи в анализе методов адаптивного управления фазой светового пучка [1, 2, 3], в разработке корректоров волнового фронта [4, 5]. Вместе с тем основная часть экспериментальных исследований по адаптивной оптике относится к 70-м годам, когда были получены первые обнадеживающие результаты. Тогда же были выполнены первые работы по компенсации нелинейных искажений лазерного излучения, например [6, 7]. В последующем опубликованы результаты отдельных экспериментов по адаптивной фокусировке пучка в нелинейной среде [8, 9].

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию адаптивной фазовой компенсации ветровой рефракции светового пучка.

1. Нелинейные искажения излучения в движущейся среде возникают в проточных CO_2 -лазерах и усилителях, при распространении на открытых атмосферных трассах. Эти искажения проявляются в основном в отклонении пучка навстречу ветру и в его дефокусировке в направлении, перпендикулярном скорости ветра. Для компенсации ветровой рефракции применимо управление по низшим абберациям фазы светового пучка. Согласно теоретическому анализу [10] при управлении по низшим абберациям, включая кому, критерий качества пучка, распространяющегося в условиях ветровой рефракции, составляет 90% от предельного значения, достигаемого при управлении без ограничений на фазу пучка. Как показано в [11], при управлении наклоном и кривизнами волнового фронта пучка его критерий фокусировки возрастает в 2–3 раза. Эти результаты являются теоретическим обоснованием возможности создания простых и эффективных систем адаптивной компенсации ветровой рефракции с помощью модального управления по низшим абберациям фазы. В таких системах достаточно сравнительно небольшого числа (до десяти) каналов управления, что повышает их надежность и устойчивость работы.

Длительность установления нелинейных искажений при ветровой рефракции определяется конвективным временем $\tau_V = \frac{a_0}{V}$ (a_0 – радиус пучка, V – скорость ветра) и составляет 0,1–1 с. Поэтому компенсация ветровой рефракции возможна с помощью узкополосных модальных корректоров фазы, управляемых, например, электромеханическими приводами.

Сформулированным требованиям удовлетворяет корректор волнового фронта (КВФ) в виде упругого зеркала, которое изгибается тягами, расположенными на его контуре [12, 13]. В данной работе использовалось закрепленное в центре зеркало диаметром $D = 50–70$ мм на металлической упругой подложке. Для получения отражающей поверхности оптического качества на подложку наклеивалась стеклянная пластина. На практике была достигнута точность обработки в одну интерференционную полосу в пределах рабочей апертуры зеркала, составляющей 0,5–0,6 D . Применение электромеханических приводов на шаговых двигателях обеспечило широкий динамический диапазон управления фазой с перемещением отражающей поверхности до 300 мкм.

Изготовленные зеркала с шестью эквидистантно расположенными приводами осуществляют управление наклонами, сферической фокусировкой, астигматизмами волнового фронта отраженного пучка. В результате фаза пучка $\varphi(x, y)$ формируется в виде

$$\varphi(x, y) = 2 K \sum_{i=1}^5 U_i \omega_i(x, y), \quad (1)$$

где $\omega_i(x, y)$ – базисные моды корректора; U_i – величина управления по соответствующей моде.

Как показали интерференционные измерения, моды зеркала $\bar{w}_i(x, y)$ отклоняются от полиномов Цернике $Z_i(x, y)$, описывающих оптические абберации, не более чем на 5, 20, 15% соответственно для наклонов, фокусировки и астигматизмов.

2. Лабораторное исследование ветровой рефракции и ее компенсации основывается на теории подобия в нелинейной оптике. Результаты лабораторного эксперимента по модельной компенсации ветровой рефракции светового пучка подобны натурным измерениям, если совпадают соответствующие критерии подобия [14].

Блок-схема адаптивной установки, разработанной в соответствии с критериями подобия, приведена на рис. 1. Лабораторное моделирование атмосферной трассы осуществлялось с помощью вертикально расположенной кюветы 5, заполненной спиртом. Пучок аргонового лазера 1, отраженный от управляемого зеркала 3, вводился в кювету через нижнее окно. После ее прохождения пучок отбрасывался зеркалом на экран 6, изображение с которого регистрировалось телекамерой 10 и после оцифровки системой ввода 9 поступало в ЭВМ 7 [15]. В ЭВМ изображение обрабатывалось согласно заданному алгоритму, и по результатам обработки формировались команды на блок управления КВФ 8. Таким образом, замыкалась связь в цепи управления фазой светового пучка.

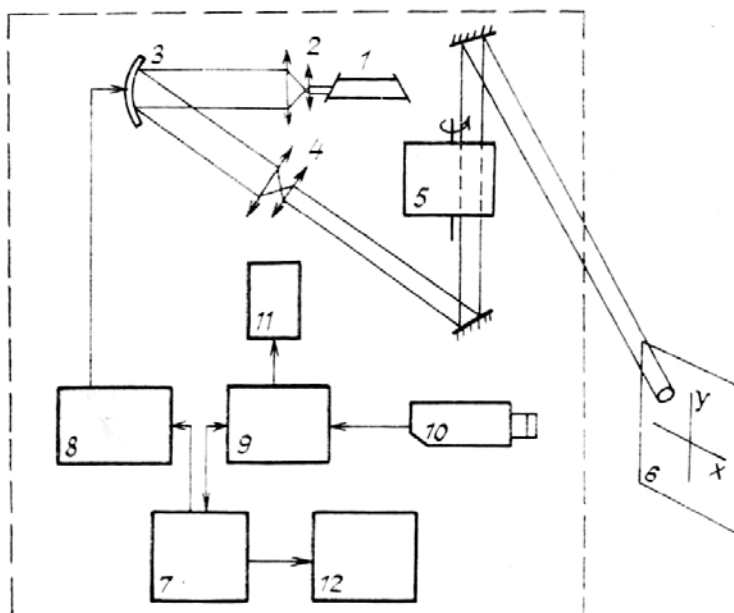


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2, 4 – телескопы; 3 – управляемое зеркало; 5 – кювета; 6 – экран в плоскости наблюдения; 7 – ЭВМ; 8 – блок управления КВФ; 9 – система регистрации; 10 – телекамера; 11 – монитор; 12 – устройство вывода информации

Для имитации ветрового потока кювета вращалась вокруг вертикальной оси. Изменение расстояния пучка от оси позволяло варьировать скорость «ветра», которая оставалась постоянной по «трассе». Выполнение условий подобия осуществлялось заданием радиуса a_0 , мощности P_0 пучка на входе в кювету, а также коэффициента поглощения α путем добавления фуксина в спирт. В установке длина кюветы составляла $z = 70$ см, коэффициент поглощения $\alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}$, радиус пучка $a_0 = 0,7 - 1,4$ мм, скорость потока $V = 0,3$ см/с. Длина волны излучения $\lambda = 0,488$ мкм. Мощность пучка P_0 менялась от 10 до 50 мВт. Для данных параметров установки критерии подобия изменялись в пределах: $z = 0,06 - 0,24$, $\Theta = 4 - 18$, $|R_V| = 70 - 300$.

Количественные измерения параметров пучка в процессе управления осуществлялись по оцифрованному изображению, регистрируемому телекамерой. В ЭВМ по изображению вычислялись значения пиковой интенсивности, эффективной ширины пучка в направлениях, параллельных a_x и перпендикулярных a_x скорости ветра, а также смещения энергетического центра тяжести x_{II} . На основе этих измерений, как показано ниже, организован алгоритм управления фазой.

Следует отметить, что измерения с помощью телекамеры вносят существенные погрешности, так как ее динамический диапазон не позволяет воспроизвести без искажений изображение пучка, в сечении которого значения интенсивности меняются больше, чем на 1–1,5 порядка. В результате пик интенсивности в ряде случаев ограничивается сверху, что приводит одновременно к завышению эффективной ширины пучка. Поэтому для проведения абсолютных измерений радиуса пучка использовался масштабированный экран (погрешность не превышала 10%), для измерения пиковой интенсивности – измеритель мощности типа SPECTRA – PHYSICS-404 с диафрагмой $\varnothing = 0,5$ мм.

3. Алгоритм адаптивного управления, с помощью которого формируются сигналы управления, является одним из основных факторов, определяющих устойчивость и сходимость процесса компенсации. Из теоретического анализа [3] следует, что процедура фазового сопряжения теряет устойчивость с увеличением параметра нелинейной рефракции R_V . В модальной системе с небольшим числом каналов управления предпочтительнее использовать алгоритмы на основе градиентной оптимизации

некоторого критерия качества пучка [16]. Обычно в качестве такого критерия выступает скалярная величина, например, функционалы фокусировки, резкости и т.д. [1]. Однако практическая реализация управления на основе скалярного критерия наталкивается на серьезные трудности. Во-первых, градиентные методы оптимизации имеют вблизи экстремума медленную сходимость и слабую устойчивость при наличии шума в канале регистрации. Во-вторых, при использовании скалярного критерия все координаты управления становятся равноправными и взаимосвязанными, что снижает устойчивость процесса оптимизации и быстродействие адаптивной системы. Поэтому в последнее время значительные усилия направлены на поиск новых алгоритмов управления [17, 18].

При модальном управлении в базисе низших оптических аберраций возможно существенное повышение эффективности работы адаптивной оптической системы на основе одновременного анализа совокупности скалярных критериев, выбор которых подчинен требованию разделения каналов управления. Целенаправленная обработка изображения светового пучка в плоскости наблюдения дает необходимую информацию для получения такой совокупности критериев.

В установке использовался многокритериальный алгоритм модального управления [19]. Алгоритм основывается на построении таких функционалов $\hat{F}_i[I(x, y, z_0)]$ интенсивности $I(x, y, z_0)$ в плоскости наблюдения z_0 , которые зависят преимущественно от управления U_i по соответствующей моде $w_i(x, y)$:

$$\hat{F}_i[I(x, y, z_0)] = f_i(U_i; \mu U_j), \mu \ll 1, i \neq j, \quad (2)$$

где параметр μ характеризует связь между каналами.

Пусть $I(x, y, z_0)$ текущее, а $I^0(x, y, z_0)$ требуемое распределение интенсивности в плоскости z_0 , тогда компонентами векторного критерия качества \mathbf{J} являются следующие величины:

$$J_i = \hat{F}_i[I(x, y, z_0)] - \hat{F}_i[I^0(x, y, z_0)]. \quad (3)$$

Если функционалы \hat{F}_i линейно зависят от управления U_i , то вектор искомого управления U_i^0 , при котором достигаются значения \hat{F}_i^0 определяется по формуле

$$\mathbf{U}^0 = \mathbf{U} - \hat{\mathbf{A}}\mathbf{J}, \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{A}}$ — матрица управления.

В случае $\mu = 0$ функционалы \hat{F}_i становятся сопряженными модам $w_i(x, y)$ и матрица $\hat{\mathbf{A}}$ является диагональной. Происходит полное расщепление каналов управления, когда искомое значение каждой компоненты U_i вектора управления определяется лишь соответствующей компонентой J_i вектора критерия.

На практике взаимная связь каналов управления ($\mu \neq 0$) может быть обусловлена различными факторами. Принципиальным здесь является вопрос существования сопряженных операторов, что взаимосвязано с конкретным выбором базиса модального управления w_i .

Не менее существенное значение имеет вопрос о возможности практического вычисления этих функционалов. Далее взаимная связь каналов может возникнуть из-за погрешности воспроизведения мод реальным фазовым корректором. Наконец, в нелинейной среде нарушается принцип суперпозиции, и при управлении по некоторому каналу происходит изменение всех функционалов интенсивности. В этом случае элементы матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ зависят от распределения интенсивности и процесс формирования заданного профиля интенсивности $I^0(x, y, z_0)$ приобретает итерационный характер. Приращение вектора управления $\Delta \mathbf{U}^k$ на k -м итерационном шаге можно вычислить путем линеаризации соотношения (4):

$$\Delta \mathbf{U}^k = \hat{\mathbf{A}} (I^{k-1}) \Delta \mathbf{J}^{k-1}. \quad (5)$$

Однако если указанные факторы не являются доминирующими, т.е. относительная погрешность КВФ мала, функционалы управления близки к сопряженным ($\mu \ll 1$ в (2)), нелинейность слабая и преобладают линейные процессы дифракции при распространении пучка, то можно ожидать, что каналы управления будут практически независимыми между собой и матрица $\hat{\mathbf{A}}$ будет близка к диагональной. В результате применение многокритериального алгоритма в реальных условиях позволит ускорить сходимость и повысить устойчивость итерационного процесса адаптивного управления фазой светового пучка. Как показывает анализ, проведенный для случая линейной среды распростране-

ния, при управлении фазой светового пучка в базе низших оптических aberrаций в качестве функционалов \hat{F}_i сопряженных базисным модам, можно использовать:

$$\begin{aligned} \hat{F}_1[I] &= M\{x\} = x_{ц}; & \hat{F}_2[I] &= M\{y\} = y_{ц}; \\ \hat{F}_{3,4}[I] &= M\{(x-x_{ц})^2\} \pm M\{(y-y_{ц})^2\} = a_x^2 \pm a_y^2; \\ \hat{F}_5[I] &= M\{(x-x_{ц})(y-y_{ц})\} = a_{xy}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $M\{f(x, y)\} = \int \int f(x, y) I(x, y, z_0) dx dy / \int \int I(x, y, z_0) dx dy$, $x_{ц}$ и $y_{ц}$ — смещения энергетического центра тяжести.

При этом для функционалов \hat{F}_i ($i = 1, 2$) параметр μ равен нулю, в функционалах \hat{F}_4 и \hat{F}_5 имеется зависимость от управления фокусировкой U_3 с параметром $\mu = z_0$. Функционал \hat{F}_3 зависит также от управлений $U_4 - U_5$. Поэтому для расщепления каналов управления в задаче фокусировки необходимо использовать последовательную компенсацию. Сначала, управляя астигматизмами U_4 и U_5 , достигаются минимумы модулей функционалов $|\hat{F}_4|$ и $|\hat{F}_5|$ с заданной точностью. В результате

уменьшается влияние этих aberrаций на величину функционала \hat{F}_3 характеризующего фокусировку.

Затем производится управление фокусировкой U_3 . По достижении минимума \hat{F}_3 система в случае необходимости вновь возвращается к управлению астигматизмами. Так организуется итерационный процесс поэтапного управления астигматизмами и фокусировкой, при котором удается в значительной степени развязать каналы управления по aberrациям второго порядка. Описанный процесс модального управления ослабляет алгоритмическую связь между каналами, которая возникает при использовании той или иной процедуры обработки изображения и формирования сигналов управления. Понятно, что средствами управления невозможно расщепить связь между модами для нелинейных искажений, где нарушается принцип суперпозиции.

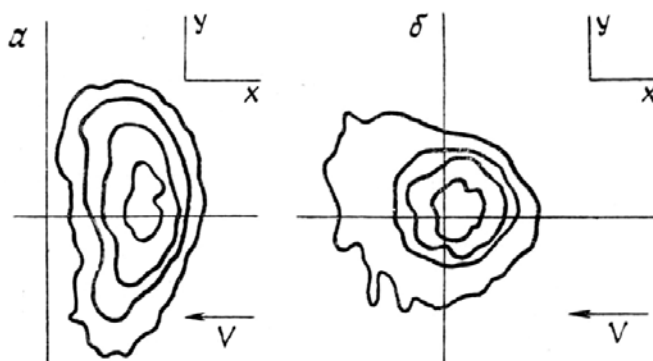


Рис. 2. Изображение светового пучка в установившемся режиме ветровой рефракции: *a* — без компенсации; *б* — после завершения процесса адаптивной компенсации. Пересечение сплошных линий соответствует положению энергетического центра пучка в отсутствие нелинейных искажений

Заметим, что поскольку связь между каналами управления по aberrациям первого и второго порядка отсутствует, то при коррекции можно использовать одновременное управление наклонами ω_1, ω_2 и астигматизмами ω_4, ω_5 в соответствии с (4).

4. Рассмотрим компенсацию ветровой рефракции при сравнительно небольшой мощности пучка $P_0 = 25$ мВт, что соответствует параметру нелинейности $R_V = -130$. В этом случае характерный набег фазы, оцениваемый в приближении заданного поля, составляет $\phi \sim R_V z \sim 8$ рад.

Установившийся режим ветровой рефракции при данных параметрах излучения иллюстрируется рис. 2. В отсутствие управления изображение пучка имеет серповидную форму: ширина пучка a_y в перпендикулярном потоку направлении в 2–2,5 раза превышает его ширину a_x в направлении потока, его энергетический центр смещается навстречу ветровому потоку на расстояние радиуса уширенного пятна.

После замыкания цепи обратной связи в системе управления осуществляется компенсация астигматизмов, фокусировка пучка и наведение его в заданную точку. После завершения итерационного процесса адаптивной компенсации искажений изображение пучка принимает форму, близкую к осесимметричной; его центр тяжести практически совпадает с заданной точкой наведения (рис. 2, б).

Изменение распределения интенсивности I в сечениях пучка приведено на рис. 3. Из рисунка видно, что фокусировка в плоскости, перпендикулярной потоку, приводит к увеличению пиковой интенсивности в плоскости наблюдения (рис. 3, б). В плоскости, параллельной потоку, происходит незначительная подфокусировка и отклонение пучка для наведения его центра тяжести в точку наблюдения (рис. 3, а). По данным с ЭВМ расходимость пучка в направлении, перпендикулярном направлению ветра, уменьшилась в 2 раза, расходимость вдоль потока уменьшилась на 30–40%. По визуальным измерениям с помощью масштабированных экранов угловая расходимость центрального максимума пучка составляет 1,3–1,5 от дифракционной. Пиковая интенсивность после компенсации возросла в 2,2–2,4 раза.

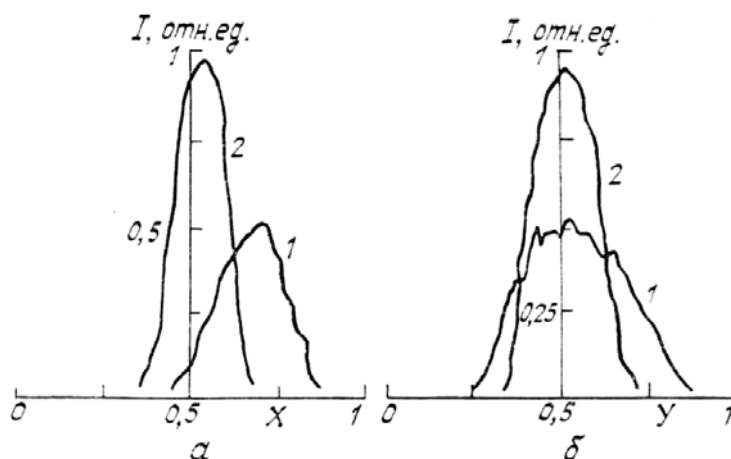


Рис. 3. Распределение интенсивности в сечениях пучка в установившемся режиме ветровой рефракции: а – по оси Ox ; б – по оси Oy , проходящей через энергетический центр пучка; 1 – без компенсации, 2 – после адаптивной фокусировки

Изменения компонент вектора критерия \mathbf{J} , характеристик пучка a_x , a_y , x_c , величины сигналов управления \mathbf{U} в процессе адаптивной компенсации представлены на рис. 4. Видно, что на первых двух шагах ($N = 1, 2$) после включения обратной связи система корректирует астигматизм U_4 и затем переходит к управлению по фокусировке, $N = 3$ (рис. 4, а, б). После этого производится дополнительная коррекция по астигматизму ($N = 4$). Сфокусировав пучок с заданной точностью ($N = 5, 6$), система переходит к управлению по наклону U_1 ($N = 7$). Итерационный процесс управления закончился на 8 шаге.

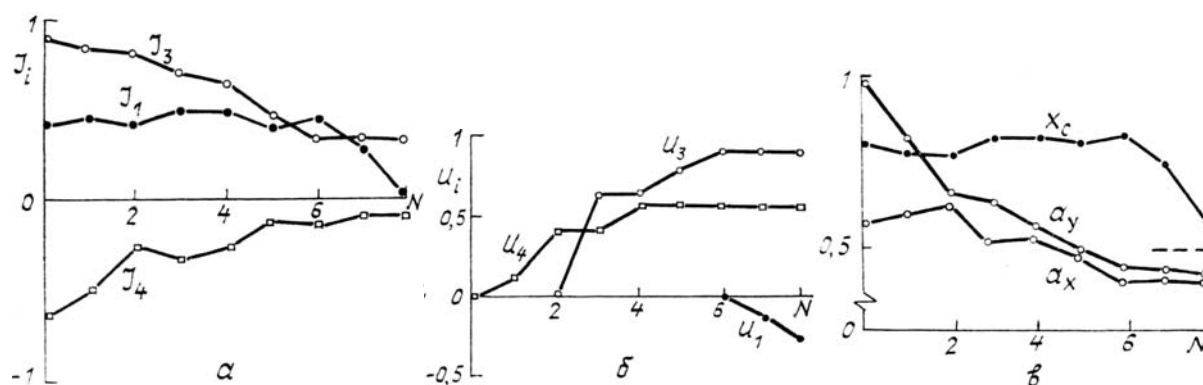


Рис. 4. Поведение компонент вектора критерия \mathbf{J} (а), вектора управления \mathbf{U} (б) и характеристик пучка (в) в процессе компенсации ветровой рефракции ($R_V \approx -130$, $\theta \approx 18$). Штриховая линия соответствует координате x_c энергетического центра в отсутствие нелинейных искажений

Изменение энергетического центра пучка x_c , его эффективной ширины a_x и a_y , измеренной по осям Ox и Oy , в процессе управления представлено на рис. 4, в. Видно, как при управлении астигматизмом U_4 на шагах $N = 1, 2$, а также $N = 4$ происходит уменьшение ширины a_y и одновременно увеличение a_x . При фокусировке, осуществляемой на шагах $N = 3$ и $N = 5, 6$, обе ширины a_x и a_y уменьшаются. Управление наклонами U_1 на седьмом и восьмом шагах практически не меняет размеров пучка a_x и a_y , обеспечивает его наведение в заданную точку.

Подобные исследования были проведены для других значений параметра нелинейности. Так, при мощности $P_0 = 50$ мВт ($R_V = -260$) после адаптивной компенсации угловая расходимость в направ-

лении, перпендикулярном скорости ветра, уменьшилась в 2 раза, а в направлении по потоку — в 1,6 раза. В результате угловая расходимость пучка на выходе из кюветы составила 1,7–1,9 от дифракционно ограниченного значения. Пиковая интенсивность в пучке после управления возросла приблизительно в 2,6 раза.

5. Результаты приведенных исследований свидетельствуют об эффективности модального управления фазой светового пучка для компенсации нелинейных искажений, вызванных ветровой рефракцией. Эксперименты продемонстрировали устойчивую сходимость многокритериального алгоритма управления в условиях нелинейности. При этом итерационный процесс компенсации нелинейных искажений завершается за 8–10 шагов управления. При длительности одного шага — 1 с квазистационарное адаптивное управление на основе многокритериального алгоритма позволяет отслеживать медленные пульсации скорости ветра на атмосферных трассах, характерный период которых составляет ~ 10 с.

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
2. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
3. Выслоух В.А., Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. //Изв. вузов. Физика. 1985. Т. 28. № 11. С. 30–41.
4. Тараненко В.Г., Горохов Ю.Г., Романюк Н.Р. //Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 8. С. 19–43.
5. Воронцов М.А., Гнедой С.А., Кудряшов А.В. и др. Зеркала на основе пассивных биморфных элементов. Шатура, 1987. 29 с. (Препринт/НИЦТЛ АН СССР, № 29).
6. Primmerman S.A., Fouché D.G. //Appl. Opt. 1976. V. 15. № 14. P. 990–995
7. Bridges W.B., Pearson J.-E. //Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. № 9. P. 539–543.
8. Иванов А.В., Кандидов В.П., Криндач Д.П., Попов В.В. //Тез. докл. V Всесоюз. конф. «Оптика лазеров». Л.: ГОИ, 1986. С. 205.
9. Васильев А.А., Воронцов М.А., Кудряшов И.А., Шмальгаузен В.И. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. С. 1735–1736.
10. Nahrstedt D.A. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 2. P. 224–252.
11. Чесноков С.С. //Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 4. С. 1160–1165.
12. Кандидов В.П., Ларионова И.В., Попов В.В. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 8. С. 836–842.
13. Кандидов В.П., Попов В.В. Модальный корректор для компенсации низших оптических аберраций. М., 1989. 5 с. (Препринт/МГУ. Физ. фак. № 16).
14. Кандидов В.П., Криндач Д.П., Попов В.В., Чесноков С.С. //Распространение оптических волн в атмосфере и адапт. оптика. (Сб. научн. статей). Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 9.
15. Митрофанов О.А., Попов В.В. //ПТЭ. 1989. № 5. С. 249.
16. Чесноков С.С. //Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1986. Т. 50. С. 796–798.
17. Сухоруков А.П., Трофимов В.А. //Квант. электроника. 1987. Т. 14. С. 2261–2263.
18. Безуглов Д.А. //Квант. электроника. 1989. Т. 16. С. 1612–1616.
19. Кандидов В.П., Митрофанов О.А., Попов В.В. //Квант. электроника. 1989. Т. 16. С. 1548–1550.

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова,
Москва

Поступила в редакцию
10 сентября 1990 г.

V.P. Kandidov, D.P. Krindach, O.A. Mitrofanov, V.V. Popov. **Adaptive System of Phase Compensation of Nonlinear Distortions under Thermal Self-Action of Light Beam.**

Results are presented of laboratory investigation of adaptive focusing of laser beam penetrating under flow refraction. The many-criteria algorithm of modal control of a light beam phase is applied. High velocity and stability of iterational process of adaptive beam focusing are demonstrated.