

К. ф.-м. н. В. П. СИВОКОНЬ

Украина, г. Херсон, Экономико-правовой институт

Дата поступления в редакцию
13.10 1998 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. А. ДРОЗДОВ

ГИБРИДНАЯ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Предложенная система способна компенсировать фазовые искажения не только плоской волны, но и лазерных пучков с неоднородным амплитудным профилем.

The proposed circuit is able to compensate phase distortions not only flat waves, but laser beam of rays with non-uniform amplitude profile.

За последние годы в технологии производства фазовых корректоров высокого разрешения — таких как адаптивные зеркала, жидкокристаллические модуляторы (ЖКМ) и жидкокристаллические телевизоры (ЖКТВ) — произошли значительные изменения. Теперь возможно получение фазовых корректоров с числом каналов управления $N=200$ (зеркала) [1] и даже 10000 (ЖКТВ) [2]. Использование для таких систем старых алгоритмов управления наталкивается на ряд трудностей. Классические адаптивные системы, основанные на оценке волнового фронта с помощью гартмановского датчика, резко теряют свою эффективность и катастрофически дорожают с ростом N [3]. Другие подходы, основанные на послерегистрационной обработке, такие как метод фазового разнообразия [4], восстановление по биспектруму [5] или прямое восстановление фазы по зарегистрированным распределениям интенсивности [6], характеризуются низким быстродействием и вряд ли смогут быть использованы в реальных адаптивных системах ближайшего будущего.

В данной статье представлена гибридная высококоразрешающая электрооптическая система для подавления фазовых искажений и итеративный алгоритм для ее управления. Главным преимуществом системы является то, что она работает только с распределениями интенсивностей (зарегистрированных в ближнем и дальнем поле), избегая, таким образом, прямого измерения фазы. Каждый корректирующий шаг алгоритма включает регистрацию распределения интенсивности и его простую обработку (в основном фильтрацию в спектральной области). В основу алгоритма положен тот факт, что благодаря дифракции фазовые искажения могут быть трансформированы в неоднородности интен-

сивности в ближнем поле. Используя это распределение интенсивности, мы можем организовать отрицательную обратную связь так, что работа нашей электрооптической системы будет приводить к подавлению фазовых искажений.

В настоящей реализации алгоритм слабо чувствителен к крупномасштабным фазовым искажениям, так что предполагается, что они (по крайней мере наклоны и дефокусировка) компенсируются независимо с помощью обычной адаптивной оптики. В силу различия временных и пространственных масштабов у крупно- и мелкомасштабных фазовых искажений такое разделение каналов может дать заметные дополнительные преимущества. Однако это требует и слабого взаимного влияния каналов, что как раз и реализуется в нашем алгоритме.

Предлагаемый алгоритм управления высококоразрешающими фазовыми корректорами весьма близок к процессам, происходящим в оптических системах с нелинейной двумерной оптической обратной связью [7], которые доказали эффективность коррекции фазовых искажений у плоской волны. Главным отличием является то, что в нашей системе обратная связь реализована не оптически, а электронно, обеспечивая тем самым большую свободу конструкции системы и модификации алгоритма.

Проведенное нами численное моделирование работы системы показало, что предложенная система способна компенсировать фазовые искажения не только плоской волны, но и лазерных пучков с неоднородным амплитудным профилем. Обнаружено также, что в некоторых случаях компенсация искажений сопровождается возникновением локализованных фазовых состояний (малых областей), где фаза имеет сдвиг на 2π . Такой сдвиг фазы ровно на 2π никак не проявляется в реальных оптических системах видения или фокусировки излучения, но может оказаться полезным в иных оптических приложениях (оптическая память, выделение особенностей и т. п.).

Конфигурация системы

Оптическая схема системы высокого разрешения для подавления фазовых искажений представлена на **рис. 1, а**. Система имеет два отдельных канала, причем коррекция крупномасштабных аберраций Φ_k осуществляется обычной адаптивной опти-

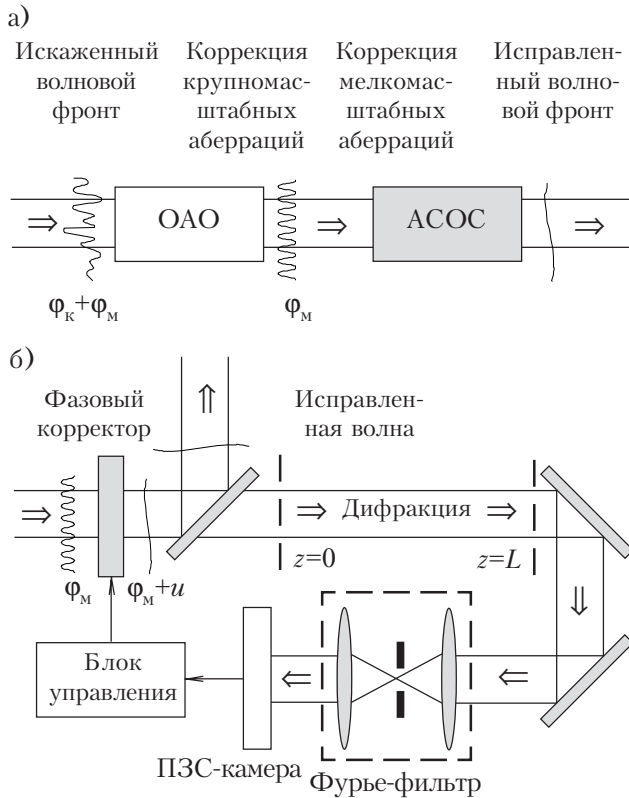


Рис. 1. Оптическая схема высокоразрешающей системы подавления фазовых искажений

кой (ОАО), а подавление мелкомасштабных фазовых искажений φ_m производится высокоразрешающей адаптивной системой с обратной связью (АСОС), более подробная схема которой представлена на рис. 1, б.

Падающая световая волна с комплексной амплитудой $A^{пад}(r,t) = A_0(r) \exp(i\varphi(r,t))$ (где $i^2 = -1$, t — время, $r = \{x, y\}$ — пространственные координаты в плоскости, перпендикулярной оси распространения z , $A_0(r)$ — амплитуда, $\varphi(r,t)$ — фаза волны) проходит последовательно через крупномасштабный фазовый корректор (обычно гибкое деформируемое зеркало ДЗ) и высокоразрешающий сегментный корректор (обычно ЖКМ или ЖКТВ). Выходящая волна $A^{вых}(r,t) = A_0(r) \exp(i\psi(r,t))$ имеет остаточную фазу $\psi(r,t) = \varphi(r,t) + u(r,t)$, где $u(r,t)$ — полная корректирующая фаза, вносимая как ДЗ, так и ЖКТВ. Подавление искажений приводит к тому, что фазовые aberrации выходящей волны заметно меньше aberrаций входящей: $|\psi| \ll |\varphi|$.

Главной частью контура подавления мелкомасштабных aberrаций является преобразование фазы в интенсивность (“визуализация фазы”), которое в данной системе осуществляется посредством дифракции выходящей волны от $z=0$ до $z=L$ и последующей ее фильтрации в спектральной области. Эта фильтрация может быть проведена оптически посредством пары линз и малой диафрагмы, входящих в состав Фурье-фильтра (см. рис. 1, б). Интенсивность дифрагировавшей и отфильтрованной волны, которая при определенных условиях будет

пропорциональна фазе волны, затем регистрируется стандартным устройством на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС-камерой) и служит входным сигналом в цепи электронной обратной связи. Отметим, что можно удалить оптический Фурье-фильтр и провести требуемую фильтрацию дифрагировавшей волны электронным образом посредством компьютера. Таким образом можно осуществить более гибкую и сложную обработку интенсивности, что в ряде случаев может быть очень эффективно.

Итерационная схема коррекции

Пусть падающая волна $A^{пад}(r,t)$ имеет стационарный профиль интенсивности $I_0(r) = |A_0(r)|^2$ и фазы $\varphi(r)$. Тогда комплексная амплитуда поля $A(r,z,t)$ сразу после фазового корректора (в плоскости $z=0$, рис. 1, б) имеет вид

$$A(r,0,t) = A_0(r) \exp[iu(r,t) + i\varphi(r)]. \tag{1}$$

Определим итерационную процедуру коррекции фазы для управляющего сигнала $u^{(m)} = u(r, t = t_m)$ как

$$u^{(m+1)} = (1 - \alpha^{(m)})u^{(m)} + \alpha^{(m)}Ru_{oc}^{(m)}, \quad m = 1, 2, 3, \dots; \tag{2, a}$$

$$u_{oc}^{(m)} = f_{ТВ} \{G\{I_L^{(m)} - I_0\}\}. \tag{2, б}$$

Здесь $\alpha^{(m)}$ — некоторый параметр, R — коэффициент обратной связи, $u_{oc}^{(m)}(r)$ — сигнал обратной связи, $f_{ТВ}(I(r))$ — кривая чувствительности ЖКТВ или ЖКМ, применяемого в системе, а $G\{\}$ обозначает оператор, который описывает требуемую фильтрацию интенсивностей волны: $I_0(r)$ — до дифракции и $I_L^{(m)}(r)$ — после дифракции на расстоянии L . Если Фурье-фильтр (рис. 1) реализован электронно, то

$$G\{I_L^{(m)} - I_0\} \equiv F^{-1}\{TF\{I_L^{(m)} - I_0\}\}, \tag{3}$$

где F, F^{-1} — соответственно прямое и обратное Фурье-преобразование; $T = T(q)$ — передаточная функция фильтра. (В дальнейшем мы будем иметь дело только с ротационно-инвариантными фильтрами, передаточная функция которых зависит только от модуля $q = |\mathbf{q}|$ вектора пространственной частоты $\mathbf{q} = \{q_x, q_y\}$: $T(\mathbf{q}) = T(q)$.)

Смысл алгоритма коррекции (2) состоит в том, что на каждом шаге для получения новой фазы корректора $u^{нов}$ к текущей фазовой оценке $u^{(m)}$ добавляется вклад, пропорциональный распределению интенсивности дифрагировавшей волны $Ru_{oc}^{(m)}$, изменение которого, как можно показать, отражает изменение самой фазы $u^{(m)}$. При этом отрицательность коэффициента обратной связи R гарантирует уменьшение абсолютного значения остаточной фазы $\psi = \varphi + u$ на следующем шаге: $|\psi^{(m+1)}| < |\psi^{(m)}|$. Следует также отметить, что алгоритм (2) можно в какой-то степени считать дискретным, конечно-разностным аналогом дифференциального уравнения, описывающего процессы в нелинейных оптических системах с обратной связью. Как было показано в [7], такие системы способны компенсировать фазовые искажения, но только у плоской волны. В отличие от таких нелинейных оптических систем фильтрация в (2, б) не самой интенсивности I_L дифрагировавшей волны, а разности между ней и интенсив-

ностью входной волны I_0 , позволяет устранить паразитное перерастание крупномасштабных неоднородностей интенсивности в неоднородности фазы. Это обеспечивает эффективную коррекцию фазовых искажений не только для плоской волны, но и для более реальной световой — светового пучка.

Для сегментированного корректора с функциями отклика $S_n(r)$ поршневого типа (случай ЖКТВ) управляющая фаза принимает вид

$$u(r, t) = \sum u_n(t) S_n(r), \quad n=1, \dots, N, \quad (4)$$

где $u_n(t)$ — сигнал управления n -го сегмента (канала) — определяется как

$$u_n(t) = (1/a^2) \int u(r, t) S_n(r) d^2r, \quad n=1, \dots, N. \quad (5)$$

(Здесь мы предполагаем, что все сегменты имеют одинаковую квадратную ($a \times a$) геометрию, и их функции отклика $S_n(r)$ не пересекаются. Данная ситуация типична для ЖК-телевизора, работающего в фазовом режиме.)

Обобщенная схема итерационной процедуры коррекции волнового фронта для предлагаемого алгоритма показана на рис. 2, где через I_{oc} обозначена интенсивность “обратной связи” (используемая для вычисления сигнала обратной связи u_{oc}). Поскольку этап дифракции реализован оптически, то каждый шаг процедуры требует выполнения только двух преобразований Фурье (для оператора G), что может быть быстро выполнено в реальном масштабе времени.

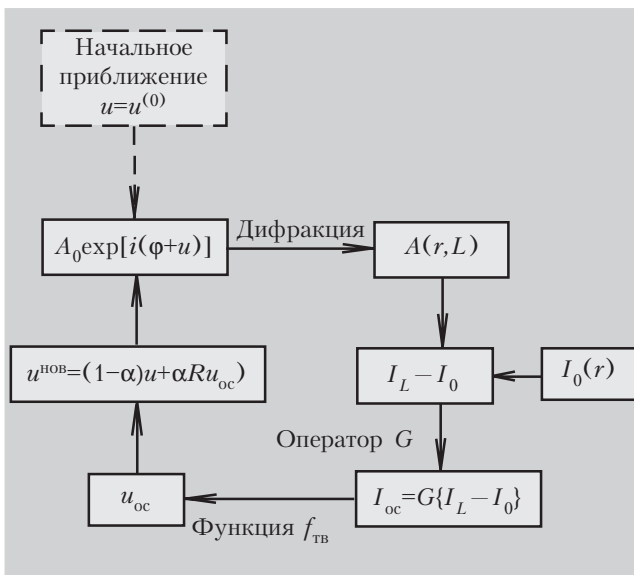


Рис. 2. Итерационная схема коррекции

Анализ спектрального коэффициента подавления фазовых искажений $P(q) = \Psi(q) / \Phi(q)$ для данной итерационной процедуры в линейном приближении был проведен в [8], где было получено следующее выражение для $P(q)$:

$$P(q) = 1 / [1 - 2RI_0 T(q) \sin(q^2 L / 2k)]. \quad (6)$$

Здесь $\Phi(q) = F\{\phi\}$ и $\Psi(q) = F\{\psi\}$ — спектры исходной и остаточной фазы, $k = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор, λ — длина волны излучения.

В соответствии с (6) подавление фазовых искажений происходит в спектральных областях, где $|P(q)| < 1$. Для отрицательного коэффициента обратной связи ($R < 0$) это приводит к требованию

$$T(q) \sin(q^2 L / 2k) > 0. \quad (7)$$

Во избежание самовозбуждения и усиления искажений необходимо изменять знак передаточной функции фильтра $T(q)$ в тех спектральных областях, где синус в (7) меняет знак. Легко показать, что эти области соответствуют кольцам с радиусами $q_k (q_k^2 L / 2k = K\pi, K=1, 2, 3, \dots)$. В силу квадратичной зависимости от q в (7) такой фильтр трудно реализовать на практике, и обычно ограничиваются работой только в первом кольце $q < q_1$, где условие (7) заведомо выполнено.

Моделирование системы

Мы провели компьютерное моделирование работы итерационного алгоритма как для сегментного, так и для непрерывного фазового корректора. Во всех вычислениях коэффициент обратной связи был равен $R = -8$, параметр $\alpha = 0,1$. Дифракция световой волны описывалась с помощью уравнения квантооптики

$$-2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad (8)$$

которое решалось по стандартной методике с помощью быстрого преобразования Фурье [9, с. 258]. Вычисления проводились на квадратной однородной сетке 128×128 . Для моделирования коррекции фазы для светового пучка диаметра D мы использовали супергауссовский профиль в виде

$$A_0(r) = \exp\left[-\left(\frac{2r}{D}\right)^{16}\right]. \quad (9)$$

Каждая реализация случайной фазы $\phi(r)$ формировалась в спектральной области, и условие $\Phi^*(q) = \Phi(-q)$ всегда выполнялось, чтобы $\phi(r)$ была действительной функцией. Сила aberrаций задавалась изменением $|\Phi|$ и характеризовалась стандартным отклонением σ фазы и соответствующим числом Штреля (St) [9, с. 62]. (Напомним, что число Штреля равно отношению интенсивности искаженной волны в фокусе линзы к соответствующей интенсивности для неискаженной волны. Оно всегда меньше или равно 1 и показывает относительную степень деградации волны за счет фазовых искажений.)

Для оценки деградации в коррекции, вызванной конечным числом каналов управления сегментного корректора N , мы провели серию вычислений. Передаточная функция фильтра $T(q)$ тождественно равнялась 1 всюду внутри первой зоны стабильности $q < q_1$ и 0 — вне ее. Внутри этой зоны спектральная плотность фазы имела постоянную амплитуду $\Phi(q) = \Phi_0$ и случайную δ -коррелированную фазу, однородно распределенную в интервале $[0, 2\pi]$, так что в идеальном случае корректор был способен произвести полную коррекцию этих искажений.

В качестве модельной функции $f_{ТВ}$ ЖК-телевизора использовалась модуляционная кривая реаль-

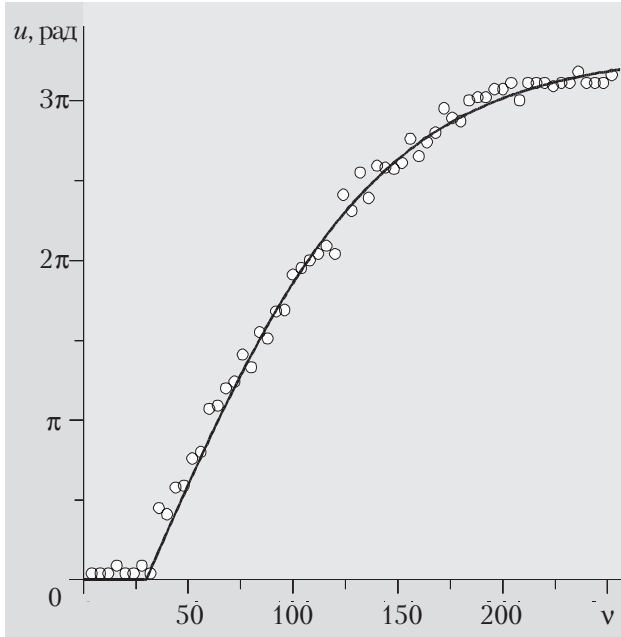


Рис. 3. Типичная модуляционная кривая ЖК-телевизора

ного ЖКТВ из работы [10]. Ее график приведен на рис. 3.

Результаты численного моделирования представлены в виде графика эффективности фазовой коррекции в зависимости от числа каналов управления (числа сегментов корректора) N для случая умеренных фазовых искажений ($St=0,69$, $\sigma=0,61$ рад) — рис. 4 (σ^2 — дисперсия фазы). Примеры искаженной и скорректированной фазы (точки $a-f$) представлены в нижней части рис. 4. Изображения g и h — это спектры искаженной (a) и скорректированной (f) фазы. Корректор с $N=128 \times 128$ соответствует управлению каждым узлом вычислительной сетки, т. е. корректору с непрерывной поверхностью. Характерным примером таких корректоров могут являться жидкокристаллические пространственные модуляторы света. Сегментация корректора типична для ЖК-телевизоров, работающих в фазовом режиме [2, с. 585]. Количество итераций, необходимых для сходимости итерационного процесса, во всех случаях было в пределах 20–30.

Представленные результаты подтверждают эффективность итерационного алгоритма коррекции (2). Они также показывают, что сегментный корректор обеспечивает приемлемую коррекцию только если характерный размер сегмента $a=1/\sqrt{N}$ меньше характерного размера фазовых неоднородностей: $a < 2\pi/q_\phi = 2\pi/q_1 = 1/16$. Физический смысл данного результата очевиден.

* * *

Проведенный анализ демонстрирует высокий потенциал данной системы для коррекции фазовых искажений световых пучков, в т. ч. с неоднородным распределением интенсивности по сечению пучка. Перспективным представляется также возможность использования данной адаптивной системы как

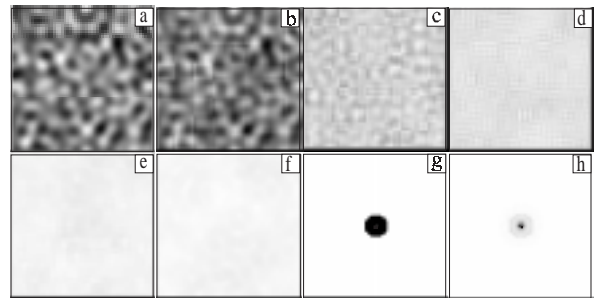
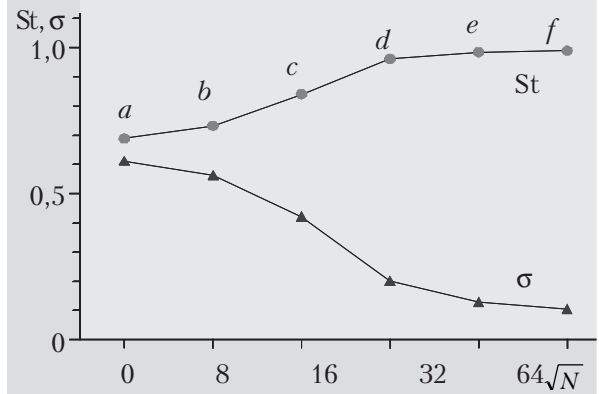


Рис. 4. Эффективность подавления фазовых искажений

вторичного контура адаптивной коррекции мелко-масштабных искажений, наведенных атмосферой.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Roggemann M. C., Welsh B. M. Imaging through turbulence. — Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996.
2. Spatial light modulator technology: materials, devices and applications / Ed. U. Efron. — N.-Y.: Marcel Dekker Press, 1995.
3. Primmerman C. A., Price T. R., Humphreys R. A. et al. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions // Appl. Opt. — 1995. — Vol. 34. — P. 2081–2088.
4. Gonsalves R. A. Nonisoplanatic imaging by phase diversity // Opt. Lett. — 1994. — Vol. 19. — P. 493–495.
5. Beckers J. M. Adaptive optics for astronomy: principles, performance and applications // Annual review of astronomy and astrophysics. — 1993. — Vol. 31. — P. 13–62.
6. Ivanov V. Yu., Sivokon V. P., Vorontsov M. A. Phase retrieval from a set of intensity measurements: theory and experiment // J. Opt. Soc. Am. — 1992. — Vol. A9. — P. 1515–1524.
7. Degtiarev E. V., Vorontsov M. A. Spatial filtering in nonlinear two-dimensional feedback systems: phase-distortion suppression // Ibid. — 1995. — Vol. B12. — P. 1238–1248.
8. Sivokon V. P., Vorontsov M. A. High-resolution adaptive phase distortion suppression based solely on intensity information // Ibid. — 1998. — Vol. A15. — P. 207–215.
9. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985.
10. Dou R., Vorontsov M. A., Sivokon V. P., Giles M. K. Iterative technique for high resolution phase distortion compensation in adaptive interferometers // Optical Engineering. — 1997. — Vol. 36. — P. 3327–3335.