

УДК 621.373

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СО СДВИГОВЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ В ЦЕПИ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

П. В. Иванов, А. В. Корябин, В. И. Шмальгаузен

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Приведены результаты линейного анализа, численного моделирования и экспериментального исследования адаптивной оптической системы с жидкокристаллическим модулятором фазы и сдвиговым интерферометром в цепи обратной связи. Результаты экспериментов по компенсации мелкомасштабных фазовых искажений хорошо согласуются с теоретическими и численными оценками.

Введение

К настоящему времени известен уже целый ряд адаптивных систем, в которых корректором фазы является оптически управляемый жидкокристаллический (ЖК) модулятор света (транспарант) [1–3]. Для формирования управляющего светового пучка в цепи оптической обратной связи таких систем использовался интерферометр с опорным пучком [1], а также оптический элемент, осуществляющий преобразование Гильберта [2] или визуализацию фазы при дифракции [3].

В традиционных адаптивных системах с электронным контуром управления в качестве датчика волнового фронта широко применяются сдвиговые интерферометры [4]. Интерферометр радиального сдвига использовался также в системе с сегментированным электронно-управляемым ЖК-модулятором фазы [5].

Идея использования интерферометра сдвига в адаптивном устройстве с оптической обратной связью реализована в системе, описанной в работе [6]. Управляющий световой пучок формировался с помощью интерферометра поперечного сдвига с клинообразной отражательной пластиной и голографического фильтра. В этой работе проведен линейный анализ устойчивости системы и получены экспериментальные результаты по коррекции мелкомасштабных фазовых искажений. Вместе с тем представляет интерес сравнение экспериментальных данных с результатами численного расчета, не ограниченного рамками линеаризованной модели.

Основные соотношения

Рассмотрим работу адаптивной системы с оптическим контуром управления, служащим для компенсации фазовых искажений (рис. 1). Пусть на вход оптической системы поступает световой пучок с фазовыми искажениями $F(r, t)$. Этот пучок отражается от поверхности ЖК-модулятора фазы 1, затем часть его отводится в цепь оптической обратной связи с помощью светоделительной пластины 2. В цепи обратной связи фазовые неоднородности с помощью сдвигового интерферометра 3 преобразуются в управляющее распределение интенсивности I , которое переносится на фоточувствительный слой модулятора с помощью зеркал 4. При этом показатель преломления ЖК-слоя модулятора изменяется и в

систему вносится дополнительный корректирующий набег фазы $U(r, t)$, который описывается следующим уравнением диффузионного типа [1]:

$$T_0 \frac{\partial U}{\partial t} + U = d \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + G(I), \quad (1)$$

где T_0 — постоянная времени модулятора, x и y — поперечные координаты, d — коэффициент диффузии фотоиндуцированного заряда в фотопроводнике, $G(I)$ — статическая характеристика модулятора.

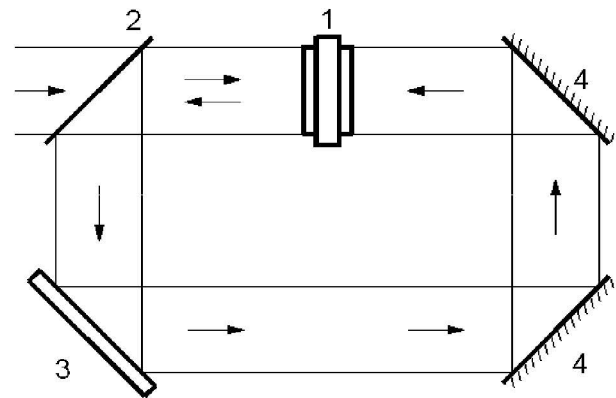


Рис. 1. Обобщенная схема адаптивной оптической системы для компенсации фазовых искажений: ЖК-модулятор фазы (1), светоделительная пластина (2), сдвиговой интерферометр (3) и зеркала (4)

Исходный световой пучок с фазовыми искажениями $F(r, t)$ при отражении от ЖК-модулятора приобретает суммарную фазу $H(r, t) = F(r, t) + U(r, t)$. Для компенсации фазовых искажений обратная связь должна быть организована таким образом, чтобы $F(r, t) \approx -U(r, t)$ и, следовательно, $H(r, t) \approx 0$.

Статическая характеристика транспаранта $G(I)$ (1) хорошо аппроксимируется известной зависимостью [4]:

$$G(I) = G_0 \operatorname{th}(I/I_s + C), \quad (2)$$

где G_0 — максимальный набег фазы, вносимый ЖК-модулятором, I_s — интенсивность насыщения модулятора, C — постоянный коэффициент.

Управляющее распределение интенсивности на выходе интерферометра поперечного сдвига описывается следующим соотношением [6]:

$$I \cong BI_0 [1 + \gamma \cos(\Delta H + \Delta_0)], \quad (3)$$

$$\Delta H(x, y, t) = H(x + S, y, t) - H(x, y, t),$$

где B — коэффициент, учитывающий суммарные потери в кольце обратной связи; I_0 — интенсивность входного пучка; γ — контрастность интерференционной картины; Δ_0 — средний фазовый набег, определяющий положение рабочей точки интерферометра; S — поперечный сдвиг пучков в интерферометре.

Наконец, отметим, что в силу непрерывности светиндуцированного заряда на границе фоточувствительного слоя модулятора фаза $U(r, t)$, вносимая модулятором в пучок, должна удовлетворять граничным условиям второго рода.

Анализ работы системы при малых возмущениях

При условии малости суммарной фазы $H(x, y, t)$ анализ работы системы можно провести в линейном приближении:

$$\cos(\Delta U + \Delta F + \Delta_0) \approx \cos(\Delta_0) + (\Delta U + \Delta F) \sin \Delta_0.$$

В случае выбора рабочей точки на линейном участке характеристики транспаранта справедливо приближение

$$G(I) \approx kI + C_1, \quad (4)$$

где $k = \partial G / \partial I$, C_1 — постоянные коэффициенты. Для распределения интенсивности (3) из (4) получаем выражение

$$G(I) = kB_0 I_0 (1 + \gamma \cos(\Delta U + \Delta F + \Delta_0)). \quad (5)$$

В случае стационарного коэффициента подавления гармонических фазовых искажений $A = \left| \frac{U_0 + F_0}{F_0} \right|$ (U_0 и F_0 — амплитуды гармоник) для малых возмущений в работе [4] получено выражение

$$A = \frac{D}{\sqrt{D^2 + 2K_0(K_0 + D)[1 - \cos(\Omega_1 S)]}}, \quad (6)$$

где

$$D = 1 + d(\Omega_x^2 + \Omega_y^2), \quad K_0 = -kB_0 I_0 \gamma \sin \Delta_0,$$

Ω_x и Ω_y — пространственные частоты в направлениях осей x и y соответственно.

Подавление фазовых возмущений соответствует случаю $A < 1$. Данное неравенство выполняется одновременно для всех пространственных частот (условие устойчивости системы) при $K_0 > 0$ (знак K_0 зависит от смещения голографического фильтра Δx).

Анализ работы системы при произвольных возмущениях

В случае произвольных фазовых возмущений уравнение (1) решалось численно с граничными условиями второго рода. Чисто неявная схема решалась итерационным методом. Число узлов сетки выбиралось таким образом, чтобы диффузионная длина значительно превышала размер сетки.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента подавления гармонических возмущений A от

параметра $\Omega_x S / 2\pi$, полученная численно и в приближении малых возмущений (6). Сильнее всего подавляются фазовые возмущения с пространственными частотами, удовлетворяющими соотношению $\Omega_x S / 2\pi = (2n + 1)/2$, где n — целое число. Гармоники с частотами, удовлетворяющими равенству $\Omega_x S / 2\pi = n$, не компенсируются ($A = 1$). Это объясняется тем, что на длине сдвига S укладывается целое число длин волн и, следовательно, возмущения с данными частотами не визуализируются сдвиговым интерферометром. Анализ выражения (6) показывает, что компенсация фазовых искажений неодинаково зависит от пространственных частот Ω_x и Ω_y . Условием подавления фазовых неоднородностей является отличие от нуля частоты Ω_x .

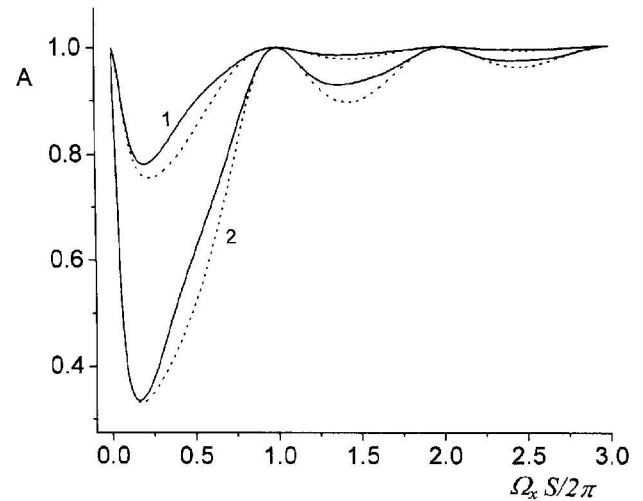


Рис. 2. Зависимость коэффициента подавления A от параметра $\Omega_x S / 2\pi$, полученная в линейном приближении (сплошная линия) и при численном моделировании (пунктир): $U_0 = 1$, $K_0 = 1$ (1) и 5 (2)

В общем случае негармонических фазовых искажений качество их компенсации удобно характеризовать относительной остаточной среднеквадратичной ошибкой σ :

$$\sigma = \left\{ \frac{\int [H(x, y) - \bar{H}(x, y)]^2 dx dy}{\int [F(x, y) - \bar{F}(x, y)]^2 dx dy} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

где $\bar{H} = \int H(x, y) dx dy$, $\bar{F} = \int F(x, y) dx dy$ — средние по апертуре значения.

Численно рассчитанная зависимость остаточной ошибки компенсации σ (7) от коэффициента обратной связи K_0 для гауссовой неоднородности:

$$F(x, y) = e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{dw^2}} \quad (8)$$

при характеристике транспаранта в приближении (2), приведенная на рис. 3, показывает, что величина σ быстро уменьшается с ростом коэффициента обратной связи K_0 . Ухудшение качества компенсации при увеличении полуширины dw гауссовой неоднородности (8) объясняется ростом доли низких частот в спектре неоднородности.

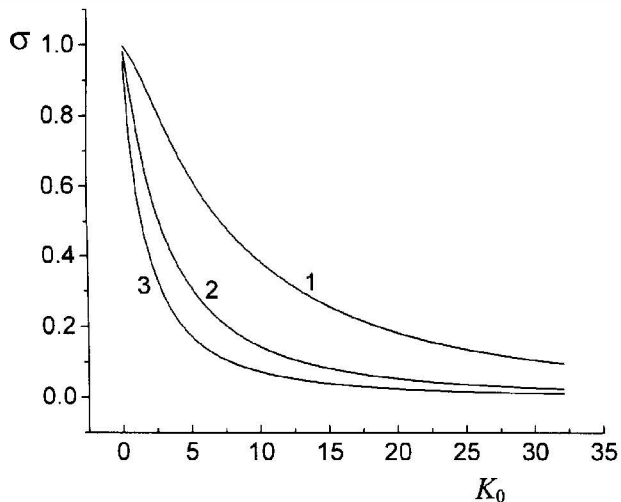


Рис. 3. Зависимость относительной остаточной среднеквадратичной ошибки компенсации σ от коэффициента обратной связи K_0 , рассчитанная при разных полуширинах гауссовой неоднородности: $dw = 0,5$ (1); $0,1$ (2) и $0,05$ (3)

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования

Экспериментально измеренные профили фазовых искажений при разомкнутой и замкнутой обратной связи представлены на рис. 4. Там же приведен фазовый профиль, полученный при численном моделировании. В качестве входного возмущения при численном решении уравнения (1) использовался экспериментально измеренный профиль входной неоднородности. Как видно из рис. 4, для замкнутой системы теоретическая и экспериментальная кривые качественно согласуются.

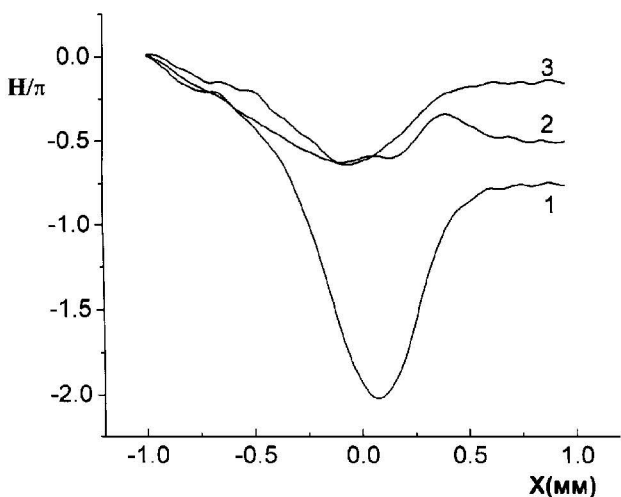


Рис. 4. Экспериментально измеренный профиль фазовых искажений при разомкнутой (1) и замкнутой (2) обратной связи, а также фазовый профиль, рассчитанный численно (3)

Коэффициент подавления фазовых искажений зависит от средней интенсивности I , что можно заключить из выражения (6). Экспериментально определенная зависимость остаточной ошибки компенсации σ от интенсивности входного пучка (рис. 5) показывает, что при увеличении интенсивности до определенной величины качество компенсации улуч-

шается. Это объясняется возрастанием значения коэффициента обратной связи K_0 . Ухудшение качества компенсации при высоких интенсивностях связано с насыщением ЖК-модулятора. Из рис. 5 видно, что при оптимальной интенсивности пучка ошибка компенсации σ составляла $0,07$. На рис. 5 представлена также аналогичная зависимость, полученная при численном моделировании. В этих расчетах для учета насыщения использовалась характеристика транспаранта в приближении (2). Расчетная зависимость удовлетворительно согласуется с экспериментальной.

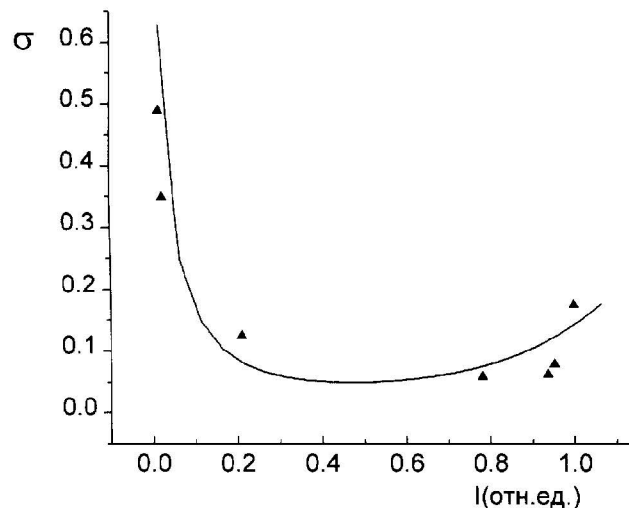


Рис. 5. Зависимость относительной остаточной среднеквадратичной ошибки компенсации σ от относительной интенсивности: точки — эксперимент, кривая — численное моделирование

Заключение

С помощью численного моделирования исследован новый метод управления корректором фазы в адаптивной системе с оптической обратной связью. Метод основан на использовании сдвигового интерферометра с клинообразной отражательной пластиной и голографического фильтра. Теоретическое исследование показало, что система способна компенсировать мелкомасштабные фазовые неоднородности. В реальном эксперименте среднеквадратичная величина фазовых искажений уменьшалась на порядок. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. Vorontsov M. A., Kirakosyan M.E., Larichev A.V. // Sov. J. Quantum. Electron. 1991. **21**. P. 105.
2. Larichev A.V., Nikolaev I.P., Violino P., Costamagna S. // Opt. Commun. 1997. **138**. P. 127.
3. Degtiarev E.V., Vorontsov M.A. // J. Opt. Soc. Am. 1995. **B12**. P. 1238.
4. Харди Дж. // ТИИЭР. 1979. **66**. С. 33.
5. Barnes T.H., Bold G.T., Haskell T.G. // Adaptive Optics. Vol. 23. New Zealand: OSA Technical Digest Series, 1995. P. 229.
6. Иванов П.В., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. // Квант. электроника. 1999. **27**, № 1. С. 78.

Поступила в редакцию
22.12.99