

Сдвиговой интерферометр в адаптивной системе с оптической обратной связью

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

Исследована адаптивная оптическая система, предназначенная для компенсации мелкомасштабных фазовых искажений, с жидкокристаллическим модулятором фазы и кольцом оптической обратной связи. Использован новый метод визуализации фазы с помощью клинообразного сдвигового интерферометра с голографическим фильтром. Аналитически исследована устойчивость системы и условия компенсации фазовых искажений. В эксперименте наблюдалось подавление мелкомасштабных фазовых искажений.

Ключевые слова: адаптивная оптика, оптическая обратная связь, сдвиговой интерферометр.

Введение

Рассмотрим адаптивную систему, предназначенную для компенсации мелкомасштабных фазовых искажений, с жидкокристаллическим модулятором фазы и кольцом оптической обратной связи. Управляющее световое поле создается клинообразным сдвиговым интерферометром и голографическим фильтром. Главным отличием предлагаемой системы от подобных систем, созданных ранее, является способ организации обратной связи. Так, например, в работе [1] для визуализации фазовых искажений применялось преобразование Гильберта, а в работе [2] использовалась визуализация фазы при дифракции.

Широкое применение сдвиговые интерферометры нашли пока только в традиционных адаптивных системах с электронным контуром управления. Так, в работе [3] была исследована система со сдвиговым интерферометром и ячеистым жидкокристаллическим модулятором фазы. Главным недостатком такой системы является сравнительно низкое разрешение.

Рассмотрим работу адаптивной системы с оптическим контуром управления, предназначенной 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 жидкокристаллического модулятора фазы с оптическим управлением 2 и затем с помощью светоделителя 1 направляется в цепь оптической обратной связи. Модуляция фазы в цепи обратной связи с помощью сдвигового интерферометра 3 и голографического фильтра 4 преобразуется в управляющее распределение интенсивности, которое затем зеркалами 5 переносится на фотопроводящий слой жидкокристаллического модулятора. При этом показатель преломления жидкокристаллического

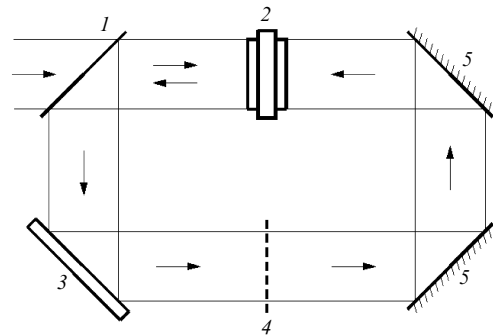


Рис.1. Обобщенная схема адаптивной оптической системы для компенсации фазовых искажений.

слоя модулятора изменяется и в систему вносится дополнительный корректирующий набег фазы $U(r, t)$.

Фазовый сдвиг $U(x, y, t)$, вносимый жидкокристаллическим модулятором, описывается следующим нелинейным уравнением диффузионного типа [4]:

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

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

Световой пучок с фазовыми искажениями $F(r, t)$ при отражении от жидкокристаллического транспаранта 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, $H(r, t) \approx 0$.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.2. Мощность He-Ne-лазера 1 была недостаточной для управления жидкокристаллическим модулятором с круговой апертурой 20 мм, поэтому лазерный пучок с

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

**Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

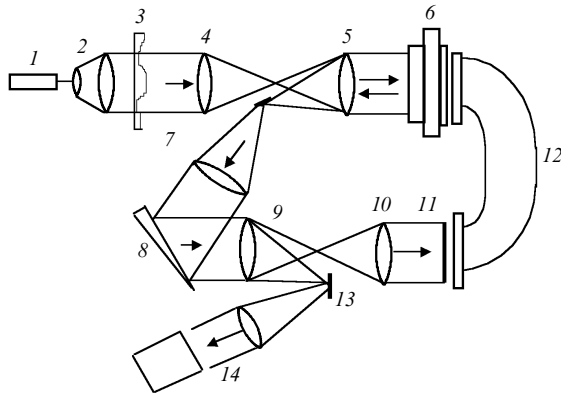


Рис.2. Схема экспериментальной установки.

помощью телескопической системы 2 расширялся в одном направлении до апертуры 20×2 мм. Фазовые искажения создавались расположенной на входе системы стеклянной пластиной 3, содержащей одномерные фазовые неоднородности. Таким образом, в системе фактически был реализован одномерный случай. Изображение с поверхности пластины переносилось линзами 4 и 5 на жидкокристаллический модулятор 6. С поверхности модулятора изображение переносилось линзами 5 и 7 на сдвиговой интерферометр 8, представляющий собой стеклянную клинообразную пластину, на грани которой было нанесено частично отражающее покрытие. В такой пластине волны, отраженные от внешней и внутренней граней, приобретают поперечный сдвиг и относительный наклон.

На выходе сдвигового интерферометра присутствуют пучки, испытавшие многократные отражения, нежелательные для системы с оптической обратной связью. В случае плоскопараллельного интерферометра устранить влияние волн высших порядков невозможно, т.к. они распространяются в одном направлении. На выходе клинообразного интерферометра отраженные волны разных порядков распространяются под разными углами, поэтому ненужные пучки могут быть легко устранены с помощью экрана (на схеме не показан), помещенного в фокальной плоскости линзы 9.

Рассмотрим работу клинообразного сдвигового интерферометра с голографическим фильтром. При падении на клинообразный интерферометр плоского пучка возникающая интерферограмма представляет собой параллельные полосы, описываемые выражением

$$I = (I_1 + I_2)(1 + \gamma_0 \cos \theta x), \quad (2)$$

где

$$\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \beta \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha};$$

I_1, I_2 – интенсивности интерферирующих пучков; γ_0 – контраст интерференционной картины; β – угол между гранями интерферометра; α – угол падения пучка на интерферометр; n – показатель преломления; λ – длина волны; ось x направлена вдоль направления сдвига пучков в интерферометре.

Голографический фильтр 11 (рис.2) представляет собой фотопластину, на которую записана интерферограмма (2), переносимая линзами 9 и 10 с интерферометра. Коэффициент пропускания такого фильтра $B(x)$ промодулирован с частотой θ :

$$B(x) = B_0(1 + \gamma \cos \theta x), \quad (3)$$

где B_0 – амплитуда модуляции коэффициента пропускания.

Если в цепи обратной связи присутствуют фазовые искажения $H(x, y)$, то форма полос на выходе интерферометра исказится и будет описываться выражением

$$I = (I_1 + I_2)[1 + \gamma_0 \cos(\Delta H + \theta x)], \quad (4)$$

где

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

S – поперечный сдвиг пучков в интерферометре. В этом случае для определения интенсивности $I(x, y)$ после фильтра необходимо интенсивность (4) умножить на коэффициент пропускания фотопластины (3):

$$I = B(x + \Delta x)(I_1 + I_2)[1 + \gamma \cos(\Delta H + \theta x)], \quad (5)$$

где Δx – смещение голографического фильтра в плоскости изображения.

Период полос интерферограммы определяется углом между гранями интерферометра. При достаточно большом угле полосы не будут разрешаться системой (вследствие диффузии заряда в фотопроводящем слое транспаранта). В этом случае для упрощения последующего анализа выражение (5) следует усреднить по малому пространственному периоду $T = 2\pi/\theta$:

$$\langle I \rangle \approx B_0(I_1 + I_2)[1 + \gamma \cos(\Delta H + \Delta_0)], \quad (6)$$

где

$$\gamma = \frac{1}{2} \gamma_0^2; \quad \Delta_0 = \theta \Delta x.$$

Выражение (6) с точностью до констант совпадает с распределением интенсивности на выходе плоскопараллельного сдвигового интерферометра с продольной разностью хода $\Delta_0 = \theta \Delta x$. Однако в данном случае выбор рабочей точки Δ_0 производится смещением голографического фильтра, причем фазовый сдвиг и направление распространения интерферирующих пучков при смещении фильтра не меняются. Аналогичная операция в плоскопараллельном интерферометре потребовала бы изменения наклона пластины, что неизбежно вызвало бы изменение сдвига и направления распространения отраженных волн.

С поверхности голографического фильтра 11 изображение переносилось стекловолоконным жгутом 12 на фотопроводящий слой жидкокристаллического модулятора. Для контроля работы системы использовался пучок, испытавший двукратное отражение в интерферометре. Для этой цели поворотной призмой 13 он направлялся в измерительное плечо 14.

2. Анализ работы системы

Предположим, что рабочая точка находится на линейном участке характеристики жидкокристаллического модулятора. В этом случае последний член в уравнении (1) приобретает вид

$$G(I) = kB_0(I_1 + I_2)[1 + \gamma \cos(\Delta U + \Delta F + \Delta_0)], \quad (7)$$

где k – коэффициент, характеризующий зависимость фа-

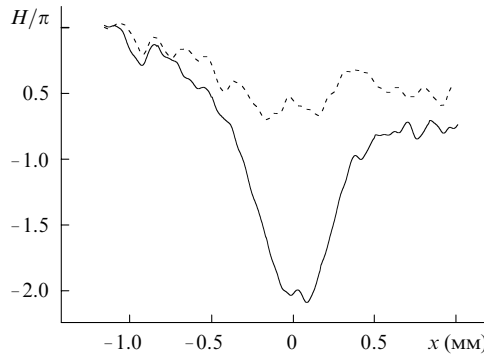


Рис.3. Профиль фазовых искажений при разомкнутой (сплошная кривая) и замкнутой (штриховая кривая) обратной связи.

зового сдвига, вносимого жидкокристаллическим модулятором, от интенсивности управляющего света. Анализ работы системы будем производить в линейном приближении при условии малости ΔH . Перейдем в уравнении (1) к двумерному пространственному фурье-спектру:

$$\bar{F}(\Omega_x, \Omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int F(x, y) \exp[i(\Omega_x x + \Omega_y y)] dx dy, \quad (8)$$

$$\bar{U}(\Omega_x, \Omega_y, t) = \frac{1}{2\pi} \int U(x, y, t) \exp[i(\Omega_x x + \Omega_y y)] dx dy,$$

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

Для стационарного коэффициента подавления гармонических фазовых искажений

$$A = \left| \frac{\bar{U} + \bar{F}}{\bar{F}} \right|$$

в линейном приближении получаем выражение

$$A = \frac{D}{\sqrt{D^2 + 2K_0(K_0 + D)(1 - \cos \Omega_x S)}}, \quad (9)$$

где $D = 1 + d(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)$; $K_0 = -kB_0(I_1 + I_2)^2 \gamma \sin \Delta_0$ – коэффициент обратной связи.

Фазовые возмущения подавляются при $A < 1$. Данное неравенство выполняется одновременно для всех пространственных частот при условии $K_0 > 0$ (знак K_0 зависит от смещения голографического фильтра Δx). Анализ выражения (9) показывает, что компенсация фазовых искажений неодинаково зависит от пространственных частот Ω_x и Ω_y . Данная система будет хорошо компенсировать только фазовые искажения, характерный масштаб которых вдоль оси x не слишком велик.

3. Экспериментальные результаты

Экспериментально измеренный профиль фазовых искажений при разомкнутой и замкнутой обратной связи изображен на рис.3 ($S = 0.42$ мм). Для количественной оценки качества компенсации вычислялась относительная остаточная среднеквадратичная погрешность компенсации σ , равная отношению среднеквадратичных фазовых искажений при замкнутой и разомкнутой обрат-

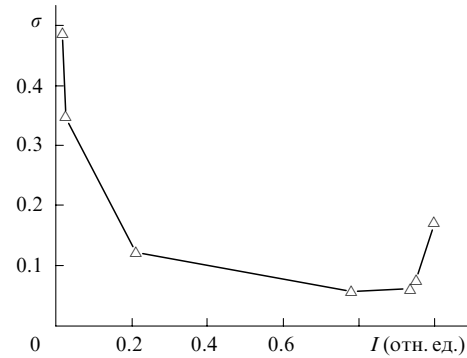


Рис.4. Зависимость относительной остаточной среднеквадратичной погрешности компенсации от относительной интенсивности.

ной связи. Для случая, представленного на рис.3, эта величина составляла 0.12.

Коэффициент подавления фазовых искажений зависит от управляющей интенсивности I , что видно из выражения (9). На рис.4 представлена экспериментально измеренная зависимость относительной остаточной среднеквадратичной погрешности компенсации от интенсивности. Видно, что при увеличении управляющей интенсивности до определенного значения качество компенсации улучшалось. Это объясняется возрастанием коэффициента обратной связи K_0 , зависящего от интенсивности. Ухудшение качества компенсации при высоких интенсивностях связано с насыщением жидкокристаллического модулятора, не учитываемым в проведенном выше теоретическом анализе. Из рис.4 также видно, что при оптимальной интенсивности пучка погрешность компенсации σ составляла 0.07.

Заключение

Предложенный новый метод организации управления в адаптивной системе с оптической обратной связью основан на использовании клинообразного сдвигового интерферометра и голографического фильтра. Аналитическое исследование показало, что система устойчива и способна компенсировать мелкомасштабные фазовые искажения. В эксперименте наблюдалась компенсация одномерных фазовых искажений (уменьшались на порядок). Следует отметить, что данная система способна компенсировать и двумерные фазовые искажения.

1. Larichev A.V., Nikolaev I.P., Violino P., Costamagna S. *Optics Comm.*, **138** 127 (1997).
2. Degtiarev E.V., Vorontsov M.A. *J.Opt.Soc.Amer. B*, **12**, 1238 (1995).
3. Barnes T.H., Bold G.T., Haskell T.G. In: *OSA Technical Digest Series* (Washington DC, 1995, v.23, p.229).
4. Воронцов М.А., Киракосян М.Е., Ларичев А.В. *Квантовая электроника*, **18**, 117 (1991).

P.V.Ivanov, A.V.Koryabin, V.I.Shmal'gauzen. Shear interferometer in an adaptive system with optical feedback.

An adaptive optical system for the correction of small-scale phase perturbations was studied, which has a liquid-crystal phase modulator and an optical feedback loop. A new method of phase visualisation with the aid of a wedge-shaped shear interferometer with a holographic filter was used. The stability of the system and the conditions of correction of phase distortions were analytically studied. In the experiments, the suppression of small-scale phase distortions was observed.

В статье замечена следующая опечатка: выше после формулы (9) вместо $K_0 = -kB_0(I_1 + I_2)^2 \gamma \sin \Delta_0$ следует читать $K_0 = -kB_0(I_1 + I_2) \gamma \sin \Delta_0$.