

УДК 68.23:681.787.7

© Е. Е. Майоров, А. В. Дагаев, С. В. Пономарев, Т. А. Черняк

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА В ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ РАСШИФРОВКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

В настоящей работе освещены методы голографической интерферометрии, которые являются высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных. Показана востребованность и актуальность применения интерферометра сдвига для измерения возмущенного объекта. Проведен анализ влияния перекрестной интерференции на точность измерений, а именно: для расстройки, не превышающей 2 мкм, ошибка измерений в режиме определения относительной величины вектора смещения не превышает 0.015 рад, что составляет 0.002 доли интерференционной полосы, а также при дополнительном смещении ~10 мкм максимальная ошибка не превышает 0.001 доли интерференционной полосы. Получено уравнение интерференции для интерферометра сдвига, где видно, что для случая вращения пластины относительно оси X_2 график зависимости разности фаз и производной от угла α_y носит существенно нелинейный характер, что приводит к деформации интерференционного поля и погрешности считывания информации. Впервые исследованы границы применимости интерферометра и даны верхняя граница диапазона измерений величины вектора смещения, равная 1.5 мм, и нижняя граница определяемого смещения — 0.01 мкм.

Кл. сл.: голографическая интерферометрия, интерферометр сдвига, голографическая интерферограмма, фазоизмерительные системы, возмущенный объект

ВВЕДЕНИЕ

Голографическая интерферометрия является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных. Уникальность методов голографической интерферометрии обусловлена ее возможностями [1]. Эти методы

- позволяют проводить исследования статических и динамических процессов;
- не предъявляют требований к качеству поверхности контролируемых объектов;
- позволяют производить сравнение волновых полей, существовавших в различные моменты времени;
- позволяют получать информацию об исследуемом процессе как в количественном, так и качественном аспектах;
- позволяют воспроизводить трехмерную видеокопию изучаемого объекта.

При исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов используются два подхода. Первый подход заключается в получении голографических топограмм поверхности объекта. Целью второго подхода является получение голографических интерферограмм возмущенного объекта [2].

Методы голографических топограмм в большинстве случаев используются для качественной оценки результатов исследований.

Наиболее информативными и точными являются методы голографической интерферометрии возмущенного объекта. Эти методы используются не только при качественном анализе, но и для количественной интерпретации результатов наблюдений.

Среди методов изучения возмущенного объекта можно выделить метод двух экспозиций. Этот метод достаточно легко реализуется, обеспечивает максимальный контраст интерференционного поля, позволяет одновременно реконструировать объектные волны, существовавшие на различных этапах исследования, а также допускает длительное хранение записанной информации.

Исследования, проводимые с использованием метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии, можно разделить на следующие этапы:

- регистрация голографической интерферограммы;
- оптическая обработка полученной интерферограммы;
- анализ полученных данных [3].

Со времени первых шагов голографической интерферометрии по внедрению в научную и лабораторную практику большие успехи достигнуты в методике регистрации интерферограмм. Современный уровень развития вычислительной техники и компьютеризация научных исследований позволяют успешно решать задачи третьего этапа — проводить качественный анализ и количественную интерпретацию полученных экспериментальных данных. Однако нет достаточных оснований утверждать, что решены все проблемы в разработке средств и методов оптической обработки голографических интерферограмм.

Изучение существующих подходов к считыванию информации с голографической интерферограммы показало, что наиболее точными и информативными являются фазоизмерительные гетеродинные системы [4], в которых фазовые характеристики интерференционного поля трансформируются в фазу электрического сигнала. Измерение последней осуществляется с применением электронной аппаратуры. Использование указанного технического решения позволяет в значительной степени снизить погрешность измерений и расширить диапазон определяемых величин.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для анализа функционирования системы обработки голографических интерферограмм с применением двухчастотного излучения необходимо конкретизировать вид используемого интерферометра сдвига и получить аналитическое выражение для разности фаз лучей, прошедших интерферометр. Из соображений виброустойчивости, а также простоты конструкции в работе предлагается использовать интерферометр Жамена, образованный двумя идентичными плоскопараллельными пластинами [5–9]. Точность, на которую претендуют данные измерений по методике, предлагаемой в настоящей работе, требует анализа интерферометра в строгом изложении.

Информация о векторе смещения содержится в изменении разности фаз $\Delta\varphi$. Метод гетеродинной голографической интерферометрии предполагает преобразование фазы интерференционных полос φ в фазу электрического сигнала Φ , которая измеряется с помощью электронной техники.

Однако сигнал интерферометра формируется в результате интерференции всех присутствующих на выходе интерферометра лучей [6, 12, 13]. Поэтому зависимость Φ от φ носит сложный характер. Для оценки погрешности измерений необходимо выяснить, как влияет наличие составляющих

$U_{\text{и}}$ — амплитуды, вносимой интерферометром, и U_{Σ} — суммарной амплитуды выходного интерференционного сигнала на зависимость $\Phi(\varphi)$.

Нелинейность зависимости разности фаз выходных лучей интерферометра в пределах апертурного угла наблюдения с необходимостью приводит к деформации интерференционного поля и, как следствие, падению амплитуды выходного сигнала. Поэтому для определения верхней и нижней границ диапазона измерений необходимо рассмотреть график зависимости амплитуды выходного сигнала от угла наклона пластины интерферометра ζ .

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКРЕСТНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Аналитическое рассмотрение

Итак, фаза интерференционных полос φ в направлении, характеризуемом апертурным углом $\alpha = \alpha_0$, изменилась от значения $\varphi = \varphi_{01}$ до $\varphi = \varphi_{02} = \varphi_{01} + \Delta\varphi$. Соответствующее изменение фазы выходного сигнала — от $\Phi = \Phi_1$ до $\Phi = \Phi_2 = \Phi_1 + \Delta\Phi$. Изменение фазы выходного сигнала $\Delta\Phi$ обусловлено изменением фазы полос $\Delta\varphi$. Получим зависимость $\Delta\Phi$ от $\Delta\varphi$ в следующем виде:

$$\Phi = \arctg \left\{ [U_{0\text{и}} \sin \varphi_{\text{и}0} + U_{0\Sigma} \sin \varphi_{0\Sigma} + U_{0\Delta} \sin \varphi_{\Delta 0}] \times [U_{0\text{и}} \cos \varphi_{\text{и}0} + U_{0\Sigma} \cos \varphi_{0\Sigma} + U_{0\Delta} \cos \varphi_{\Delta 0}]^{-1} \right\}. \quad (1)$$

Далее, при настроенном интерферометре можно констатировать явное доминирование изменения амплитуды сигнала $U_{0\Delta}$ над $U_{0\text{и}}$. Поэтому, воспользовавшись малостью величины $\chi = U_{0\text{и}} / U_{0\Delta}$, разложим выражение для Φ в ряд, пренебрегая членами второго и более высоких порядков малости

$$\Phi = \Phi(0) + \frac{\partial \Phi(0)}{\partial \chi} \chi.$$

Функция Φ при $\chi = 0$ принимает следующий вид:

$$\Phi(0) = \varphi_0 - \varphi_{0\text{и}}.$$

Соответственно для первой производной получим

$$\frac{\partial \Phi(0)}{\partial \chi} = - \left[\sin \varphi_0 + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_0 \right].$$

Тогда

$$\Phi = \varphi_0 - \varphi_{0\text{и}} - [\sin \varphi_0 + \sin 2\varphi_0].$$

Принимая во внимание, что

$\Phi_1 = \Phi(\varphi_0 = \varphi_{01})$; $\Phi_2 = \Phi(\varphi_0 = \varphi_{02})$; $\varphi_{02} = \varphi_{01} + \Delta\varphi$,
запишем

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi + \delta\varphi,$$

где для ошибки, обусловленной перекрестной интерференцией, имеем следующее выражение:

$$\delta\varphi = \left[\sin \varphi_{01} + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_{01} \right] \chi_1 - \left[\sin(\varphi_{01} + \Delta\varphi) + \frac{1}{4} \sin(2\varphi_{01} + 2\Delta\varphi) \right] \chi_2. \quad (2)$$

Таким образом, выражение (2) оценивает влияние перекрестной интерференции на точность измерений.

Расшифровка голографических интерферограмм по методу Александрова и Бонч-Бруевича

Согласно этому методу [7], три искомым уравнения получаются за счет изменения направления наблюдения \mathbf{k}_H анализируемой точки поверхности объекта. Вектор смещения \mathbf{d} при этом не меняется, и $\Delta\mathbf{d} = 0$. Следовательно, (2) принимает следующий вид:

$$\delta\varphi = \left[\sin \varphi_{01} + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_{01} - \sin(\varphi_{01} + \Delta\varphi) - \frac{1}{4} \sin(2\varphi_{01} + 2\Delta\varphi) \right] \chi, \quad (3)$$

где $\chi = \chi_1 = \chi_2$.

Наличие в полученном выражении в качестве аргумента функции \sin величины $\Delta\varphi$ позволяет сформулировать следующий вывод: если изменение направления наблюдения подчинить условию, что изменение фазы полос будет кратно 2π , ошибкой $\delta\varphi$, обусловленной перекрестной интерференцией, можно будет пренебречь.

Режим измерения относительного изменения фазы интерференционных полос

Этот режим может быть реализован в случае обработки двухэкспозиционных голограмм сфокусированных изображений, а также в случае, когда голограмма регистрируется в полосах конечной ширины. Для этого режима изменение

фазы полос происходит за счет изменения вектора смещения при переходе от одной анализируемой точки поверхности объекта к другой. Поэтому, в соответствии с [8, 14, 15],

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha \Delta d,$$

где Δd — разность величины смещения между двумя точками поверхности.

Для рассматриваемого режима переход от одной точки поверхности к другой сопровождается расстройкой интерферометра. Поэтому $\chi_1 \neq \chi_2$. Если принять, что d_1 — смещение в начальной точке анализа, Δd — изменение величины смещения, то получим

$$\delta\varphi = \left[\sin \varphi_{01} + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_{01} \right] \frac{\lambda}{d_1 \pi \alpha_H} - \left[\sin(\varphi_{01} + \Delta\varphi) + \frac{1}{4} \sin(2\varphi_{01} + 2\Delta\varphi) \right] \times \frac{2\Delta d}{d_1 \sin \frac{2\Delta d \pi \alpha_H}{\lambda}}. \quad (5)$$

Выведенные соотношения (3) и (5) снимают вопрос о влиянии перекрестной интерференции при оптической обработке голографических интерферограмм с применением сдвиговой интерферометрии. Возникающая при этом погрешность, во-первых, доступна оценке, во-вторых, является величиной контролируемой и управляемой в зависимости от геометрии схемы наблюдения, шага изменения фазы полос при съеме информации, а также от несущей частоты голографического интерференционного поля.

С целью графической интерпретации сформулированных выводов на рис. 1–4 представлены результаты расчетов фазового отклонения величины $\Delta\Phi$ от истинного значения $\Delta\varphi$. Расчет фазовой ошибки $\delta\varphi$ производился по следующей формуле:

$$\delta\varphi = \Delta\varphi - \left[\Phi_2(\varphi_{i0}, \varphi_0, \Delta\varphi, \Delta d) - \Phi_1(\varphi_{i0}, \varphi_0, \Delta\varphi, \Delta d) \right],$$

где $\Delta\varphi$ — изменение фазы интерференционных полос; Φ — фаза сигнала:

$$\Phi = \arctg \left\{ \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_H d_H}{\lambda}}{d_H} \sin \varphi_{i0} + \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_H + d + \Delta d} \cdot \sin(\varphi_{i0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_H \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \sin \Delta\varphi \right\} \times$$

$$\times \left[\frac{\sin \frac{2\pi\alpha_H d_H}{\lambda}}{d_H} \cos \varphi_{H0} + \frac{\sin \frac{2\pi d_H (d_H + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_H + d + \Delta d} \cos(\varphi_{H0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_H \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \cos \Delta\varphi \right]^{-1} \Bigg\};$$

$$\varphi_{H0} = \frac{2\pi\alpha_0 d_H}{\lambda}; \quad \varphi_0 = \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda}.$$

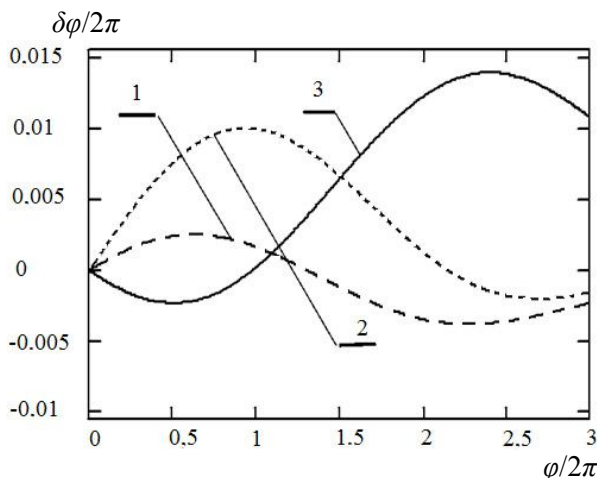


Рис. 1. Фазовая погрешность в режиме расшифровки голографических интерферограмм по методу Александра и Бонч-Бруевича.

1 — $\alpha_H = 0.1$ рад, 2 — $\alpha_H = 0.15$ рад, 3 — $\alpha_H = 2$ рад

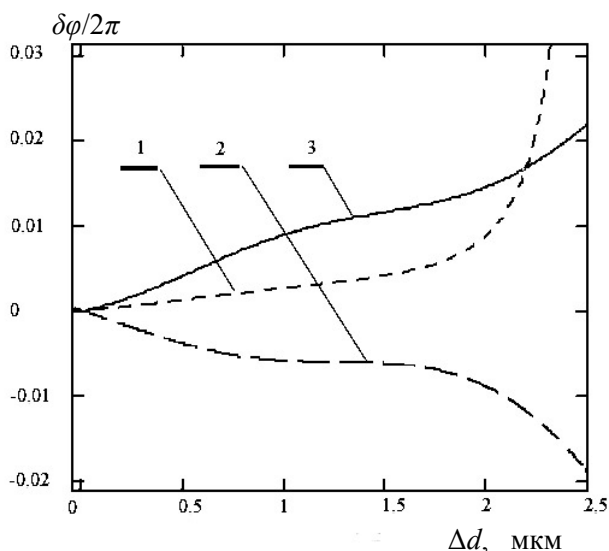


Рис. 2. Фазовая погрешность в режиме измерения относительного изменения фазы интерференционных полос.

1 — $\alpha_H = 0.1$ рад, 2 — $\alpha_H = 0.15$ рад, 3 — $\alpha_H = 2$ рад

Расчеты проводились для рассмотренных выше случаев.

В режиме относительных измерений (рис. 2)

$$d = d_H + \Delta d,$$

где Δd — величина смещения, характеризующая

расстройку интерферометра; $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_0 \Delta d$ — изменение фазы полос при сканировании голограммы; $\Phi_1 = \Phi(\varphi_0, \varphi_0, 0, 0)$, $\Phi_2 = \Phi(\varphi_0, \varphi_0, \Delta\varphi, \Delta d)$.

Расчеты выполнены для различных величин апертуры фотоприемника. Как следует из графических зависимостей, при малой расстройке интерферометра (до ~ 2 мкм) меньшая фазовая ошибка соответствует большей апертуре фотоприемника, что физически объясняется значительным превышением компоненты U_Δ над U_H и U_Σ . Однако по мере увеличения расстройки интерферометра картина меняется на противоположную: большая апертура фотоприемника обуславливает и большую погрешность. Это объясняется тем обстоятельством, что доминирование амплитуды составляющей U_Δ над U_H и U_Σ для меньшей апертуры менее критично к расстройке интерферометра. Таким образом, для расстройки, не превышающей 2 мкм, ошибка измерений в режиме определения относительной величины вектора смещения не превышает 0.015 рад, что составляет 0.002 доли интерференционной полосы.

Для случая обработки голографических интерферограмм по методу Александра и Бонч-Бруевича настройка интерферометра не нарушается, и

$$d_H = d, \Delta d = 0, \Phi_1 = \Phi(\varphi_0, \varphi_0, 0, 0), \Phi_2 = \Phi(\varphi_0, \varphi_0, \Delta\varphi, 0).$$

Как видно из графиков (рис. 2), ошибка измерения фазы также не превышает 0.002 полосы.

Зависимость фазовой погрешности от величины измеряемого смещения

Величина смещения d определяет соотношение между амплитудами составляющих U_Δ , U_H и U_Σ , что обуславливает величину фазовой погрешности.

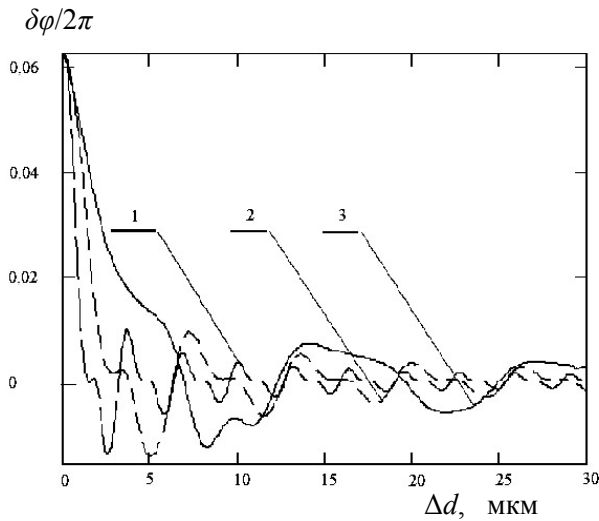


Рис. 3. Зависимость фазовой погрешности от величины смещения ($d = 0-30$ мкм).

1 — $\alpha_n = 0.1$ рад, 2 — $\alpha_n = 0.15$ рад, 3 — $\alpha_n = 2$ рад

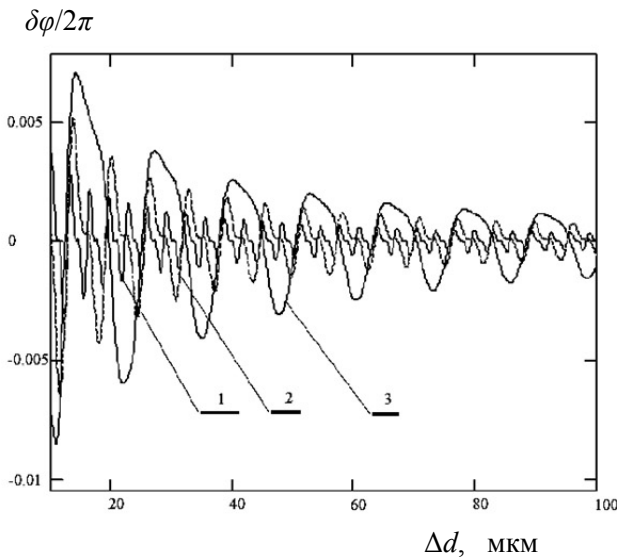


Рис. 4. Зависимость фазовой погрешности от величины смещения ($d = 15-100$ мкм).

1 — $\alpha_n = 0.1$ рад, 2 — $\alpha_n = 0.15$ рад, 3 — $\alpha_n = 2$ рад

На рис. 3 представлена графическая интерпретация данного утверждения.

Для небольших величин d превышение U_Δ над U_n и U_Σ не столь очевидно. Как следствие — относительно большая погрешность измерения (до $0.06/2\pi$). Однако с ростом d отношение $U_\Delta/(U_n, U_\Sigma)$ растет, погрешность падает. Также из графиков на рис. 4 следует, что зависимость $\delta\varphi$

от величины смещения d можно сделать сколь угодно малой, придавая объекту между экспозициями дополнительное искусственное смещение. Так, из рис. 4 следует, что при дополнительном смещении ~ 10 мкм максимальная ошибка не превышает 0.001 доли интерференционной полосы.

УРАВНЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА

Очень важным является вопрос о границах применимости интерферометра. Эта информация может быть получена при строгом анализе разности хода интерферирующих лучей.

Сдвиг в разность фаз, а также в пространственное положение соответственных элементов А и В вносится посредством взаимного наклона пластин интерферометра (рис. 5). Причем угол наклона характеризуется величиной ξ при наклоне пластины II относительно оси Y_2 и величиной ζ — при наклоне относительно оси X_2 . Амплитуда сигнала на выходе интерферометра (при настроенном интерферометре) постоянна и не зависит от величины измеряемого смещения. Однако функция разности хода интерферирующих лучей от координат поля интерференции на выходе интерферометра показывает нелинейность этой зависимости. Следовательно, разность хода лучей, распространяющихся от соответственных элементов, не может быть скомпенсирована разностью хода, вносимой интерферометром для всех точек поля интерференции. Отсюда неизбежное падение амплитуды сигнала при росте величины измеряемого смещения. Кроме того, вектор сдвига, вносимого интерферометром, имеет разную пространственную ориентацию относительно плоскости расположения соответственных элементов (или их изображений) в зависимости от осей наклона пластин интерферометра. Следовательно, нелинейность, создаваемая интерферометром, имеет разную геометрическую зависимость.

С целью графической интерпретации сформулированных выводов имеем выражение следующего вида [9, 15, 16]:

$$\varphi_{II}(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) = \varphi_1(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) - \varphi_2(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta), \quad (6)$$

где ξ, ζ — углы наклона второй пластины интерферометра вокруг осей Y_2 и X_1 соответственно; $\varphi_{1,2}(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta)$ — разность фаз лучей на выходе первой и второй пластин интерферометра соответственно;

$$\varphi_2(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) =$$

$$= \frac{4\pi nh}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha_x + \xi) + \operatorname{tg}^2(\alpha_y + \zeta) \frac{\cos^2 \alpha_x}{\cos^2(\alpha_x + \xi)}}{n^2 \left[\operatorname{tg}^2(\alpha_x + \xi) + \operatorname{tg}^2(\alpha_y + \zeta) \frac{\cos^2 \alpha_x}{\cos^2(\alpha_x + \xi)} \right]}}$$

$$\varphi_1(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) = \varphi_2(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) \Big|_{\xi, \zeta=0}$$

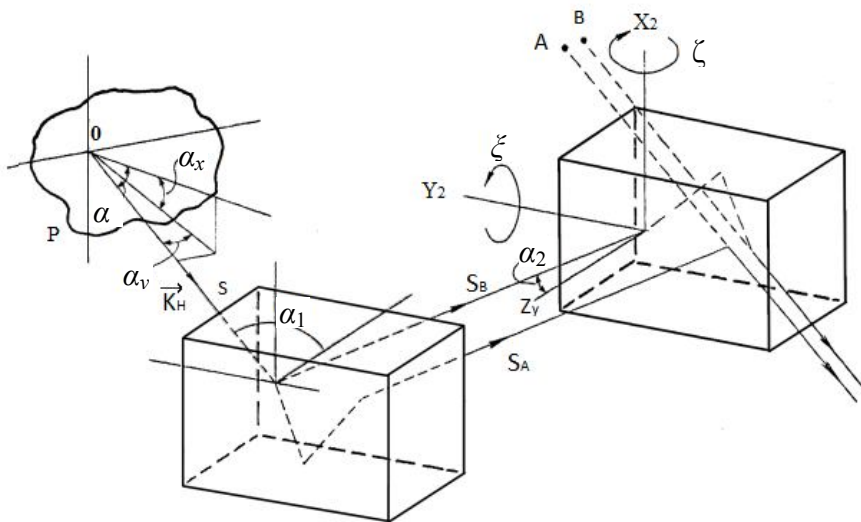


Рис. 5. Геометрия хода лучей в интерферометре Жамена.

P — объект; A, B — соответствующие элементы; X₂, Y₂, Z₂ — оси вращения второй пластины интерферометра; S — объектная волна; S_A, S_B — объектные волны после прохождения первой пластины интерферометра; α — угол наблюдения; α_x, α_y — соответствующие проекции угла наблюдения; α₁, α₂ — углы наблюдения на первой и второй пластинах интерферометра; ξ — наклон второй пластины по оси Y₂; ζ — наклон второй пластины по оси X₂; K_H — волновой вектор, характеризующий направления наблюдения

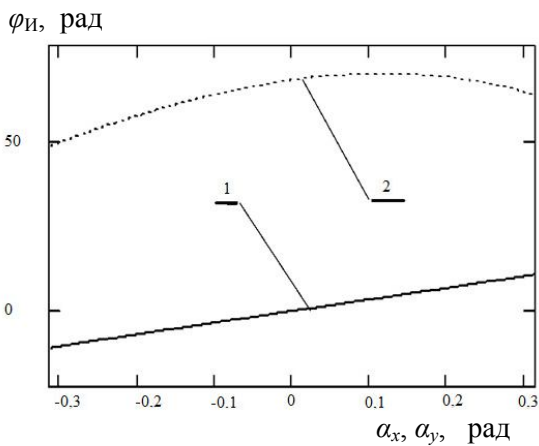


Рис. 6. Изменение фазового сдвига, вносимого интерферометром, по угловой апертуре интерференционного поля при наклоне пластины интерферометра относительно оси Y₂ (1), относительно оси X₂ (2)

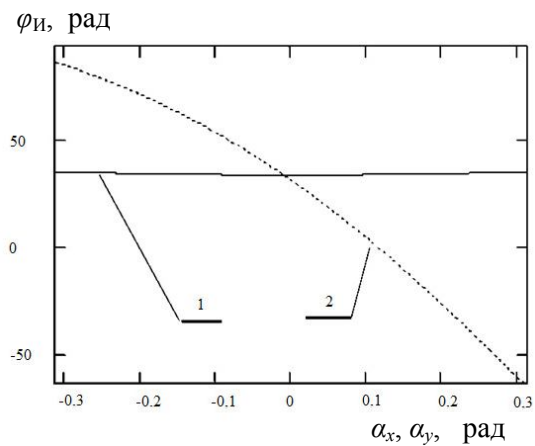


Рис. 7. Изменение производной фазового сдвига, вносимого интерферометром, по угловой апертуре интерференционного поля при наклоне пластины интерферометра относительно оси Y₂ (1), относительно оси X₂ (2)

При наклоне пластины 2 относительно Y₂ имеем

$$\varphi_{И}(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) = \varphi_1(\alpha_x, 0, 0, 0) - \varphi_2(\alpha_x, 0, \xi, 0).$$

Графическая зависимость φ_И от α_x, как следует

из рис. 6, достаточно прямолинейна на участке, значительно превышающем практически используемую апертуру наблюдения 2α_И. Производная ∂φ_И/∂α_x (рис. 7) постоянна на этом участке.

Для случая вращения пластины 2 относительно X_2 график зависимости разности фаз и производной от угла α_y носит существенно нелинейный характер, что приводит к деформации интерференционного поля и погрешности считывания информации. Результаты проведенного анализа подтверждают правильность выбора оси наклона пластины интерферометра относительно оси Y_2 , сформулированного на основании приближенных оценок.

ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ

Максимальная величина измеряемого смещения

Проведенный выше анализ разности фаз лучей на выходе интерферометра позволяет определить подход к анализу диапазона измерений величины вектора смещения.

Амплитуда сигнала рассчитывается по формуле

$$U = \int_{-\alpha_H}^{\alpha_H} \cos[\varphi_{И}(\alpha_x, \alpha_y, \xi)] d\alpha_x. \quad (7)$$

Рассчитанные зависимости амплитуды сигнала U от угла наклона представлены на рис. 8.

В процессе измерений вектора смещения интерферометр настраивается таким образом, что

$$\varphi_{И}(\alpha_x, \xi) = \varphi(\alpha_x, d),$$

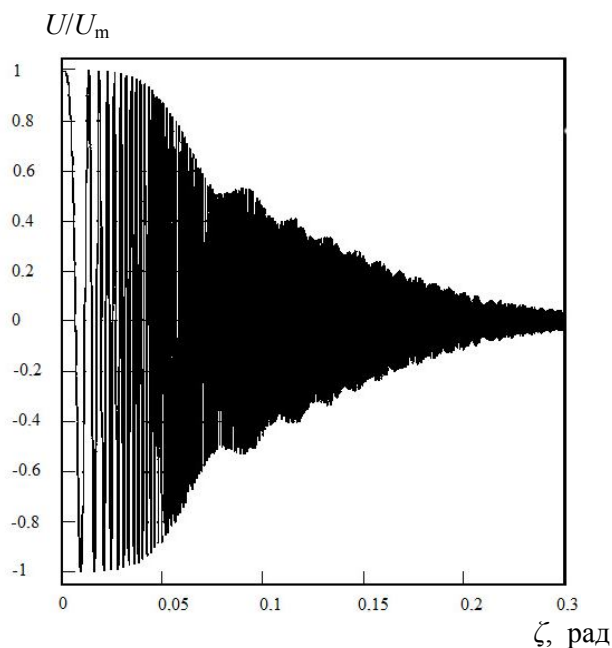


Рис. 8. Зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра от угла наклона пластины

где $\varphi_{И}(\alpha_x, \xi)$ — разность фаз лучей, вносимая интерферометром и определяемая формулой (6); $\varphi(\alpha_x, d)$ — разность фаз лучей от соответствующих элементов поверхности при восстановлении изображения объекта с голограммы.

Поскольку настройка интерферометра сдвига производится по максимуму величины выходного сигнала, который определяется минимально возможным градиентом фазы составляющей по эффективной апертуре фотоприемника, связь между величиной смещения и углом наклона можно получить из линейных соотношений [11–16]. Отсюда

$$\xi = \frac{dn}{h} \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}}.$$

Подстановка полученного выражения для ξ в (7) дает прямую зависимость амплитуды выходного сигнала от величины смещения.

Графическая зависимость амплитуды выходного сигнала от величины смещения представлена на рис. 9. Задавшись количественным критерием экстремального падения амплитуды выходного сигнала, можно обозначить верхнюю границу диапазона измерений. Так, если допустить, что амплитуда выходного сигнала не может быть меньше 1/10 своего максимального значения, из рис. 9 следует, что верхняя граница диапазона измерений величины вектора смещения равна 1.5 мм.

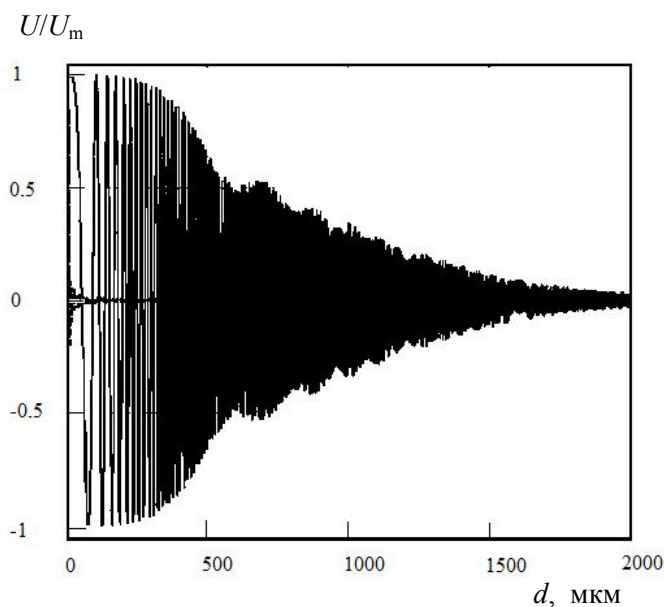


Рис. 9. Зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра от величины измеряемого вектора смещения

Минимальная величина измеряемого смещения

Погрешность определения вектора смещения находится из следующего выражения:

$$\delta d = \frac{\lambda \delta \varphi}{2\pi \sin \alpha_0},$$

где $\delta \varphi$ — погрешность определения фазы интерференционных полос.

Как следует из рис. 1, погрешность определения фазы интерференционных полос при малых d определяется влиянием дополнительных интерферирующих источников и составляет $\sim 0.02 \cdot 2\pi$ рад. Поэтому для нижней границы определяемого смещения с использованием (8) можно получить следующую оценку: при $\lambda = 0.63$ мкм, $\alpha_0 = 0.1$ рад, $d_{\text{н}} = 0.01$ мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленное исследование интерферометра поперечного сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм имеет огромное практическое значение для оптического приборостроения. Впервые проведен анализ влияния перекрестной интерферометрии на точность измерений, а также приведены границы применимости интерферометра. В работе получены выражения для максимальной и минимальной величин измеряемого смещения, что позволяет определить класс контролируемых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powell R.L., Stetson K.A. Interferometric analysis by wavefront reconstruction // J. Opt. Soc. Am. 1965. Vol. 55. P. 1593–1599. Doi: 10.1364/JOSA.55.001593.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
3. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Применение двухчастотного излучения для реализации принципов гетеродинной голографической интерферометрии с одним опорным пучком // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 43–45.
4. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С. Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 3. С. 47–51.
5. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80, no. 3. P. 162–165.
6. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.

7. Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. 1967. Т. 37, № 2. С. 360–365.
8. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование напряженно-деформированной поверхности объектов методом голографической интерферометрии // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 43–46.
9. Большаков И.П., Котов И.Р., Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Анализ влияния перекрестной интерференции на погрешность интерферометра сдвига // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 18–21.
10. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Вывод аналитического выражения для разности хода лучей, прошедших интерферометр Жамена // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 3. С. 76–81. URL: <http://iairas.ru/mag/2013/abst3.php#abst10>.
11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Система когерентной обработки спеклограмм для исследования поверхностей зубной ткани // Медицинская техника. Москва: СОО "МНТО ПМ", 2013. С. 25–27.
12. Майоров Е.Е. Измерение смещений диффузно отражающих поверхностей вне плоскости системой обработки голографических интерферограмм // Научное обозрение. 2013. № 12. С. 190–195.
13. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. Москва: СОО "МНТО ПМ", 2015. Т. 185, № 11. С. 26–31.
14. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 4. С. 61–66. URL: <http://iairas.ru/mag/2015/abst4.php#abst8>.
15. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Черняк Т.А. Оптико-электронная компьютерная система для обнаружения внешних агентов в подповерхностных слоях кожного покрова // Медицинская техника. Москва: СОО "МНТО ПМ", 2016. № 2. С. 7–10.
16. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Черняк Т.А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388–394.

Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 10.04.2017

THE STUDY OF A SHEARING INTERFEROMETER IN THE PHASE MEASURING DEVICES AND SYSTEMS OF DECODING HOLOGRAPHIC INTERFEROGRAMS

E. E. Maiorov, A. V. Dagaev, S. E. Ponomarev, T. A. Chernyak

Saint-Petersburg University of Management Technologies and Economics, Russia

In the present article the methods of holographic interferometry, which are highly informative and high-precision tool for obtaining data are presented. The relevance and urgency of application of the shearing interferometer for measurement of the disturbed object are revealed. The analysis of the effect of cross-interference on the measurement accuracy, namely: mismatch, not exceeding 2 μm , the measurement error in the mode of determining the relative magnitude of the displacement vector does not exceed 0.015 rad, accounting for 0.002 shares of interference fringes, and with the additional offset of $\sim 10 \mu\text{m}$, the maximum error does not exceed 0.001 of a share of the interference fringes are performed. Equalization interference for the shearing interferometer, where it is seen that for the case of rotation of the plate relative to the axis X_2 the graph of the phase difference and the derivative of the angle α_y is essentially nonlinear, which leads to the deformation of interference field and the error of the read information are received. The first investigated the limits of applicability of the interferometer and the upper limit of the measuring range of the magnitude of the displacement vector is equal to 1.5 mm and the lower limit determined by displacement of 0.01 μm .

Keywords: holographic interferometry, shearing interferometer, holographic interferogram, phase measurement systems, perturbed object

REFERENCES

1. Powell R.L., Stetson K.A. Interferometric analysis by wavefront reconstruction. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, vol. 55, pp. 1593–1599. Doi: 10.1364/JOSA.55.001593.
2. Vest Ch. *Golograficheskaya interferometriya* [Interferometric holography]. Moscow, Mir Publ., 1982. 504 p. (In Russ.).
3. Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [The use of two-frequency radiation to implement the principles of heterodyne holographic interferometry with a single reference beam]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2012, vol. 55, no. 12, pp. 43–45. (In Russ.).
4. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. [Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 3, pp. 47–51. (In Russ.).
5. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 3, pp. 162–165. Doi: 10.1364/JOT.80.000162.
6. Zahar'evskij A.N. *Interferometriya* [Interferometer]. Moscow, Oborongiz Publ., 1952. 296 p. (In Russ.).
7. Aleksandrov E.B., Bonch-Bruevich A.M. [Research of superficial deformations by means of the gologrammy equipment]. *ZhTF* [Soviet physics: technical physics], 1967, vol. 37, no. 2, pp. 360–365. (In Russ.).
8. Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [Measuring the stressedly-deformed surface of objects with the method of holographic interferometry]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review], 2013, no. 1, pp. 43–46. (In Russ.).
9. Bolshakov O.P., Kotov I.R., Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [Analysis of the effect of cross-interference on shearing interferometer accuracy]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2013, vol. 56, no. 5, pp. 18–21. (In Russ.).
10. Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [Derivation of an analytical expression for the path difference of the rays passed through jamin interferometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2013, vol. 23, no. 3, pp. 76–81. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/en/mag/2013/abst3.php#abst10>.
11. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [A System for the Coherent Processing of Specklegrams for Dental Tissue Surface Examination]. *Medicinskaya tekhnika. Moskva: SOO "MNTO PM"* [Biomedical engineering], 2013, vol. 6, pp. 25–27. (In Russ.).
12. Maiorov E.E. [Measuring the shift of diffusive reflective surfaces out of the plane of systematic processing of holographic interferograms]. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review], 2013, no. 12, pp. 190–195. (In Russ.).
13. Mayorov E.E., Mashek A.C., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Chaydarov G.G., Chernyak T.A. [Development of the computer interferential control system of rough surfaces]. *Pribory. Moskva, SOO "MNTO PM"* [Instruments], 2015, vol. 185, no. 11, pp. 26–31. (In Russ.).
14. Mayorov E.E., Mashek A.C., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Chaydarov G.G., Chernyak T.A. [Algorithms of processing of the information signal of the computer interference control system of non-smooth surfaces]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015,

- vol. 25, no. 4, pp. 61–66. Doi: 10.18358/np-25-4-i6166. (In Russ.).
15. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Udakhina S. V., Tsygankova G. A., Chernyak T. A. [Optoelectronic Computer System for Detection of Foreign Agents in Subsurface Layers of Skin Optoelectronic Computer System for Detection of Foreign Agents in Subsurface Layers of Skin]. *Medicinskaya tekhnika. Moskva: SOO "MNTO PM"* [Biomedical engineering], 2016, no. 2, pp. 7–10. (In Russ.).
16. Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov A.G., Chernyak T.A. Optical-electronic instrument for control over geometrical parameters of diffuse reflecting objects. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborstroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 5, pp. 388–394. (In Russ.).

Contacts: *Maiorov Evgeniy Evgen'evich*,
majorov_ee@mail.ru

Article received in edition: 10.04.2017