

УДК 535.417+535.317.1

К СРАВНЕНИЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ В ФУРЬЕ-ПЛОСКОСТИ

Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулеев Б. В.

Показано, что при регистрации диффузно рассеянного объектом поля в Фурье-плоскости реализуется одинаковая чувствительность методов голографической и спекл-интерферометрии к жесткому смещению (наклону) объекта. При этом общее число полос на спекл-интерферограмме оказывается вдвое больше, чем на голографической интерферограмме при одинаковом их периоде, поскольку автокорреляционное гало, модулированное спекл-интерферограммой, имеет протяженность, вдвое большую протяженности голографического изображения; поэтому при обработке интерферограмм путем определения расстояния между центрами полос метод спекл-интерферометрии имеет более высокую точность и более низкий порог чувствительности. Теоретический анализ и эксперимент проведены для случая совместной двухэкспозиционной регистрации голограммы и спеклограммы, отражающих наклон объекта.

Решение прикладных задач измерительной техники методами голографической и спекл-интерферометрии связано с проведением сравнительного анализа их метрологических возможностей. В литературе получила распространение точка зрения, согласно которой метод двухэкспозиционной спекл-интерферометрии имеет существенно более низкую чувствительность, чем метод голографической интерферометрии. Однако в [1] отмечено, что при измерении вращательного сдвига с регистрацией поля в плоскости резкого изображения чувствительность спекл-интерферометрии близка к чувствительности голографической интерферометрии. В [2] установлено, что при регистрации в Фурье-плоскости оба метода имеют равную чувствительность к жесткому смещению. При регистрации поля в расфокусированной зоне эти методы имеют сравнимую чувствительность [3, 4] к изгибным деформациям. Кроме того, авторы [3, 4] пришли к выводу, что в отсутствие аберраций регистрирующей линзы оба метода имеют одинаковую пороговую чувствительность, если размеры объекта равны апертуре регистрирующей линзы.

Мы рассматриваем чувствительность и точность измерения жесткого смещения объекта средствами голографической и спекл-интерферометрии при регистрации в Фурье-плоскости для объекта, поперечные размеры которого меньше апертуры регистрирующей линзы. В этом случае параметры спеклов в плоскости регистрации определяются размерами и формой объекта и распределением освещенности на его поверхности, а не апертурой линзы.

В голографической и спекл-интерферометрии сигналом измерительной информации служит интерференционная картина, параметрами которой являются период и контраст полос, а также протяженность и пространственное распределение интенсивности поля, в котором формируется эта интерференционная картина. При этом период полос в зависимости от величины смещения определяет чувствительность измерений, а остальные характеристики — точность и диапазон измерений, влияя также на пороговую чувствительность.

В целях наглядного сравнения сигналов измерительной информации, получаемых обоими методами, регистрацию голограмм и спеклограмм в Фурье-плоскости целесообразно осуществить одновременно при использовании отно-

сительно слабого опорного пучка (с интенсивностью примерно в 2 раза меньше интенсивности объектного пучка).¹

В качестве тестового смещения выберем наклон поверхности объекта на малый угол ω относительно оси y , лежащей в плоскости объекта. Известно, что такое смещение [5] приводит к линейной фазовой модуляции объектного поля вида $\exp[i(2\pi/\lambda)(1+\cos\gamma)\omega x]$ и соответственно к поперечному смещению Фурье-образа этого поля на величину $\Delta\xi = (1+\cos\gamma)\omega f$, где λ — длина волны, γ — угол падения освещающего объект пучка, x — координата в плоскости объекта, f — фокусное расстояние Фурье-преобразующей линзы.

Пусть поверхность объекта совпадает с передней фокальной плоскостью линзы и освещается плоской волной с единичной амплитудой, а регистрация

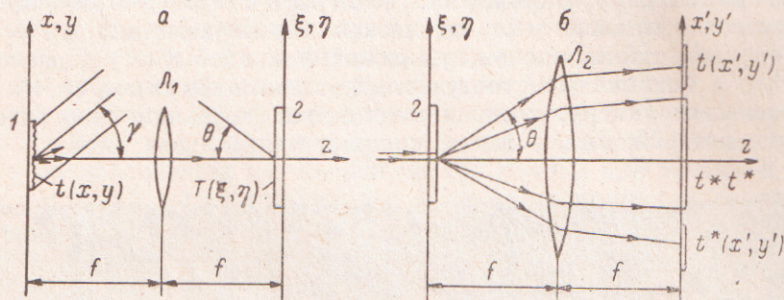


Рис. 1. Схема регистрации поля в фурье-плоскости (а) и получения голографических интерферограмм и спекл-интерферограммы (б); 1 — объект, 2 — фотопластинка, L_1, L_2 — линзы.

объектного поля производится в задней фокальной плоскости линзы (рис. 1, а). Тогда амплитудное пропускание двухэкспозиционной голограммы имеет вид

$$\begin{aligned} \tau(\xi, \eta) = & \tau_0 - k \left[|T(\xi, \eta)|^2 + 1 + T(\xi, \eta) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \xi \sin \theta\right) + T^*(\xi, \eta) \times \right. \\ & \times \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \xi \sin \theta\right) + |T(\xi - \Delta\xi, \eta)|^2 + 1 + T(\xi - \Delta\xi, \eta) \times \\ & \left. \times \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} \xi \sin \theta\right) + T^*(\xi - \Delta\xi, \eta) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \xi \sin \theta\right) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_0, k — константы, $T(\xi, \eta) = \mathcal{F}[t(x, y)]$ — Фурье-образ объектного поля, \mathcal{F} — операторный символ Фурье-преобразования, $t(x, y)$ — комплексный коэффициент отражения объекта, ξ, η — координаты в Фурье-плоскости, θ — угол падения плоской опорной волны. В (1) четвертое, восьмое и пятое, девятое слагаемые отражают регистрацию соответственно прямого и сопряженного голографических изображений, а второе и шестое слагаемые — регистрацию двухэкспозиционной спеклограммы. При записи соотношения (1) предполагалось, что размеры объекта меньше апертуры линзы, и влияние ограниченности ее размеров не учитывалось.

Пусть формирование голографических и спекл-интерферограммы производится путем освещения фотопластинки узким лазерным пучком с распределением амплитуды в его поперечном сечении, описываемом функцией $p(\xi, \eta)$. Если рассеянное на голограмме световое поле переотображается второй Фурье-преобразующей линзой (рис. 1, б), также имеющей фокусное расстояние f , то комплексная амплитуда поля в ее задней фокальной плоскости

$$\begin{aligned} U(x', y') \sim & \{(\tau_0 - 2k) \delta(x', y') - k \mathcal{F}^{-1}[T(\xi, \eta) T^*(\xi, \eta)] E(x') - \\ & - k [t(x' + f \sin \theta, y') + t^*(x' - f \sin \theta, y')] E(x')\} \otimes P(x', y'), \end{aligned} \quad (2)$$

¹ Отметим, что это не сказывается на видности голографической интерферограммы, поскольку не приводит к изменению соотношения между интенсивностями восстановленных волн.

где

$$E(x') = 1 + \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \gamma) \omega x'\right], \quad P(x', y') = \mathcal{F}^{-1}[P(\xi, \eta)],$$

$\delta(x', y')$ — дельта-функция, \mathcal{F}^{-1} — операторный символ обратного Фурье-преобразования, \otimes — знак операции свертки. Первое слагаемое в (2) описывает яркое пятно на оптической оси, образованное недифрагированным пучком. Второе слагаемое представляет собой автокорреляционную функцию изображения объекта и описывает дифракционное гало вокруг этого пятна. При этом дифракционное гало промодулировано экспоненциальной функцией $E(x')$, ответственной за формирование спекл-интерферограммы. Третье и четвертое слагаемые описывают пару сопряженных голографических изображений объекта, которые смещены относительно оптической оси на величину $\Delta x' = \mp f \sin \theta$ и промодулированы той же экспоненциальной функцией $E(x')$. Свертка с функцией $P(x', y')$, описывающей импульсный отклик оптической системы, характеризует спекл-структуру, которая модулирует дифракционное гало и голографические изображения, а также уширяет центральное пятно.



Рис. 2. Распределение интенсивности в плоскости наблюдения.

В центре — спекл-интерферограмма, по бокам — голографические интерферограммы.

Пусть период функции $E(x')$ значительно превышает размеры импульсного отклика $P(x', y')$ и, следовательно, экспоненту в (2) можно вынести из-под знака интеграла свертки. Тогда интенсивность света в плоскости $x'y'$ без учета центрального яркого пятна описывается выражением

$$I(x', y') \sim \{ | [t(x', y') \otimes t^*(-x', -y')] \otimes P(x', y')|^2 + |t(x' + f \sin \theta, y') \otimes P(x', y')|^2 + |t^*(x' - f \sin \theta, y') \otimes P(x', y')|^2 \} \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} (1 + \cos \gamma) \omega x' \right], \quad (3)$$

где \otimes — знак операции автокорреляции.

Из (3) следует, что в дифракционном гало и в обоих голографических изображениях наблюдаются интерференционные картины с одинаковым периодом, что свидетельствует об одинаковой чувствительности голографической и спекл-интерферометрии к наклонам объекта. Различие состоит в том, что в дифракционном гало укладывается в 2 раза больше полос, поскольку интервал значений переменных, в котором интеграл автокорреляции не равен нулю, определяется [6] удвоенной шириной исходной функции и, следовательно, протяженность дифракционного гало в 2 раза больше протяженности изображения.

На рис. 2 приведен фотоснимок распределения интенсивности поля в задней фокальной плоскости линзы при освещении двухэкспозиционной Фурье-голограммы неразведенным лазерным пучком перпендикулярно ее поверхности. Между экспозициями объект квадратной формы наклонялся относительно вертикальной оси на угол $\approx 15'$. Поле в центре модулировано

спекл-интерферограммой, а боковые сопряженные изображения — голографической интерферограммой. Отчетливо видно, что периоды полос на голографической и спекл-интерферограмме равны, а количество полос на последней вдвое больше.

Проведем сравнительный анализ точности и пороговой чувствительности рассматриваемых методов. Если полосы голографической и спекл-интерферограммы имеют одинаковый контраст, то точность измерения угла наклона последней вдвое выше, поскольку период полос определяется по вдвое большему их числу. При этом предполагается, что обработка интерферограмм проводится одними и теми же средствами, например, путем фотометрирования интерференционной картины.

На практике контраст спекл-интерферограмм, как правило, несколько ниже контраста голографических интерферограмм, хотя эффекты, вызывающие снижение контраста спекл-интерферограмм, в принципе могут быть исключены, что позволит обеспечить для них контраст, близкий к единичному.

Снижение контраста уменьшает точность определения центра интерференционной полосы и, как следствие, точность измерений. Нетрудно показать, что ошибка Δx нахождения положения центра полосы при заданной точности измерения вариаций интенсивности ΔI в интерференционной картине определяется выражением

$$\Delta x = \frac{\Lambda}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{\Delta I}{2I_0 V} \right), \quad (4)$$

где Λ — период полос, I_0 — интенсивность интерферирующих волн, V — контраст полос.

Предполагая, что $\Delta I = 0.1 I_0$, получаем для $V = 1$ $\Delta x \approx 0.1 \Lambda$, а для $V = 0.5$ — $\Delta x \approx 0.14 \Lambda$, т. е. снижение контраста полос вдвое ведет к снижению точности измерений примерно в 1.5 раза. В нашем эксперименте контраст полос спекл-интерферограммы составлял 0.7, а голографических интерферограмм — 0.9. Такое различие обусловлено в основном шумами фотослоя и засветкой, вызванной дифракцией света на дефектах оптических элементов. Эти шумы имеют низкочастотный характер и накладываются на автокорреляционное гало. Ошибки определения положения центра полосы составили соответственно $\Delta x_r \approx 0.11 \Lambda$ для голографической и $\Delta x_s \approx 0.12 \Lambda$ для спекл-интерферограммы.

На точность измерения периода полос влияет также распределение интенсивности в световом поле. Если интенсивность меняется по полю достаточно быстро, как, например, в автокорреляционном гало при круглом зрачке регистрирующей линзы, то центры полос оказываются несколько смещенными относительно косинусоидального распределения [7]. Для устранения этих ошибок учитывают распределение интенсивности в дифракционном гало. Кроме того, с целью получения благоприятного для измерений распределения интенсивности можно применить освещение объекта пучком кольцевого сечения.

Пороговая чувствительность рассматриваемых методов определяется минимальным регистрируемым фазовым сдвигом между интерферирующими полями. В свою очередь величина этого сдвига во многом определяется метрологическими возможностями средств обработки интерферограмм. Если обработка производится путем определения расстояния между центрами полос, то порог чувствительности определяется максимальным измеряемым периодом полос. В спекл-интерферометрии принято считать [8, 9], что период равен половине диаметра дифракционного гало, в этом случае центры светлых полос первого порядка интерференции совпадают с краем гало, а измерения проводят по темным полосам, положение которых уверенно определяется. Аналогичный критерий пороговой чувствительности следует принять и для голографической интерферометрии в предположении, что обработка полос производится теми же средствами. В этом случае центры светлых полос ± 1 порядка совпадают с краем изображения. Таким образом, пороговая чувствительность измерений определяется протяженностью поля, в котором формируется интерференционная картина, и она в 2 раза выше для спекл-интерферограммы, поскольку протяженность соответствующего светового поля в 2 раза больше. При этом отно-

сительная погрешность измерения порогового смещения по спекл-интерферограмме может быть несколько больше, чем по голографической интерферограмме, из-за более низкого контраста спекл-интерферограммы.

К аналогичному результату приводит и использование достаточно распространенного [10] критерия пороговой чувствительности, согласно которой наименьшее значение измеряемой величины определяется смещением спекл-структуры в плоскости регистрации, равным минимальному размеру спеклов в этой плоскости. Поскольку в случае, когда линейный размер объекта L меньше апертуры линзы, минимальный размер спеклов $\sigma = \lambda f / L$, а смещение спекл-структуры в Фурье-плоскости в результате наклона объекта $\Delta \xi = (1 + \cos \vartheta) \omega f$, то из равенства σ и $\Delta \xi$ следует, что наименьший угол, измеряемый средствами спекл-интерферометрии,

$$\omega_{\min} = \frac{\lambda}{L(1 + \cos \gamma)}. \quad (5)$$

При этом край объекта смещается на величину

$$\Delta z_{\min} = \omega_{\min} \frac{L}{2} = \frac{\lambda}{2(1 + \cos \gamma)}. \quad (6)$$

В голографической интерферометрии наименьший измеряемый угол определяется, как уже отмечалось, наличием на изображении двух темных полос, т. е.

$$\omega'_{\min} = \frac{2\lambda}{L(1 + \cos \gamma)}, \quad (7)$$

и при этом край объекта смещается на величину

$$\Delta z'_{\min} = \frac{\lambda}{1 + \cos \gamma}. \quad (8)$$

В частности, при $\gamma = 0$ имеем для спекл-интерферометрии $\Delta z_{\min} = \lambda/4$, а для голографической интерферометрии — $\Delta z'_{\min} = \lambda/2$.

Указанный вывод, на наш взгляд, согласуется с результатом [9], где было показано, что при нелинейной регистрации спеклограмм увеличение вдвое размеров дифракционного гало обеспечивает удвоение пороговой чувствительности измерений в спекл-интерферометрии.

Полученные выводы справедливы и для других типов жесткого движения объектов, а также для измерения амплитуд вибраций. Таким образом, чувствительность метода спекл-интерферометрии в ряде случаев может быть не только не меньше чувствительности метода голографической интерферометрии, как это принято считать, но может и превышать ее по пороговому значению.

Литература

- [1] Uozato H., Iwata K., Nagata R. — Jap. J. Appl. Phys., 1977, v. 16, N 9, p. 1689—1690.
- [2] Клименко И. С., Рябухо В. П., Федулеев Б. В., Лохова Н. В. — Опт. и спектр., 1983, т. 55, в. 3, с. 483—489.
- [3] Ennos A. E. — Opt. Commun., 1980, v. 33, N 1, p. 9—12.
- [4] Ennos A. E., Virdee M. S. — Opt. Eng., 1982, v. 21, N 3, p. 478—482.
- [5] Tiziani H. J. — Opt. Commun., 1972, v. 5, N 4, p. 271—276.
- [6] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. англ. / Под ред. Ю. И. Островского. М., 1973. 686 с.
- [7] Kaufman G. H. — Appl. Opt., 1981, v. 20, N 24, p. 4277—4280.
- [8] Redretti M., Chiang F. P. — Opt. a. Laser Technol., 1979, v. 11, N 3, p. 143—147.
- [9] Chiang F. P., Adachi J., Anastasi R., Beatty J. — Opt. Eng., 1982, v. 21, N 3, p. 379—390.
- [10] Франсон М. Оптика спеклов: Пер. англ. / Под ред. Ю. И. Островского. М., 1980. 171 с.

Поступило в Редакцию 22 мая 1985 г.