
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.23:681.787.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-331-339

ПРИМЕНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНО-СДВИГОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. Т. ПРОКОПЕНКО¹, Е. Е. МАЙОРОВ², А. Ч. МАШЕК³, Г. А. ЦЫГАНКОВА³,
В. К. АБРАМЯН⁴, Ю. Е. ЗАЙЦЕВ⁵, А. Г. ХАЙДАРОВ⁶, Г. Г. ХАЙДАРОВ⁶

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

²Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,
190103, Санкт-Петербург, Россия

³Военно-морской политехнический институт, 196604, г. Пушкин, Россия

⁴Военная академия связи им. С. М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия

⁶Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, Санкт-Петербург, Россия

Выполнена оценка различных способов настройки интерференционных полос. Рассмотрены особенности двулучевой голографической регистрации и восстановления исходного и возмущенного состояний диффузно отражающей поверхности. Проведена количественная оценка ошибки измерения: отклонение одного из опорных пучков на 10^{-5} рад приведет к набегу объектной волны на 0,22 доли интерференционной полосы; погрешность определения фазы интерференционных полос $\delta\varphi = 2\pi \cdot 0,22$. Интерферометрия сдвига по сравнению с двулучевой интерферометрией позволяет использовать один опорный пучок при прочих равных условиях, что на два порядка повышает точность измерений: $\delta\varphi = 2\pi \cdot 0,22 \cdot 10^{-2}$. Проанализирована разность фаз лучей на выходе интерферометра поперечного сдвига (интерферометр Жамена), который позволяет определить диапазон измерений величины вектора смещения. Определены максимальная $\delta d = 1,5$ мм и минимальная 0,01 мкм величины измеряемого смещения.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, фазовый набег световой волны, диффузно отражающая поверхность, интерферометр Жамена, интерферометр поперечного сдвига, диапазон измерений величины вектора смещения

Введение. Развитие высокотехнологичных способов производства обуславливает необходимость совершенствования методов и средств научной базы экспериментальных исследований. Важное место в решении указанной задачи занимают методы оптического контроля. Эти методы отличает, прежде всего, отсутствие материальных контактов с предметом исследования,

а следовательно — возможность достижения наиболее достоверных результатов эксперимента [1—3]. Универсальными методами исследований являются методы когерентной оптики, а именно голографической интерферометрии. Эти методы позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние объектов с диффузной поверхностью. Голографическая интерферометрия является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных. Уникальность методов голографической интерферометрии обусловлена ее возможностями. Эти методы позволяют, не предъявляя требований к качеству поверхности контролируемых объектов [2—5]:

- проводить исследования статических и динамических процессов;
- производить сравнение волновых полей, существовавших в различные моменты времени;
- получать количественную и качественную информацию об исследуемом процессе;
- воспроизводить в динамике трехмерную копию изучаемого объекта.

При исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов используются два подхода: получение голографических топограмм поверхности объекта и получение голографических интерферограмм возмущенного объекта.

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

Наиболее информативны и точны методы голографической интерферометрии возмущенного объекта. Эти методы используются не только при качественном анализе, но и для количественной интерпретации результатов наблюдений. Среди них 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.

В исследованиях, проводимых с использованием метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии, можно выделить следующие этапы:

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

Современный уровень развития вычислительной техники и компьютеризация научных исследований позволяют успешно решать задачи качественного анализа и количественной интерпретации полученных экспериментальных данных.

Изучение подходов к считыванию информации с голографической интерферограммы показало, что наиболее точны и информативны поперечно-сдвиговые интерференционные системы, 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.

Проведем сравнение двух способов настройки интерференционных полос. В качестве критерия сравнительной оценки выберем влияние на точность измерений отклонения опорного пучка от исходного направления.

Использование двух опорных пучков. Как отмечалось ранее [4—10], для настройки интерференционных полос в голографической интерферометрии используются два опорных источника. При двухопорной голографии регистрация и восстановление двух различных состояний объекта — исходного и возмущенного — производятся с использованием двух опорных пучков. Любое пространственное отклонение одного из опорных (восстанавливающих) пучков сопровождается идентичным изменением направления распространения соответствующей объектной волны.

Оценим ошибку измерения, возникающую при отклонении одного из опорных пучков от исходного направления.

На рис. 1 приведен пример регистрации (восстановления) голограммы с использованием двух (а) и одного (б) опорных пучков (Н — голограмма; D — апертура опорного сигнала; S_0, S'_0 — опорные пучки; \mathbf{d} — вектор смещения; А, А' — соответственные элементы).

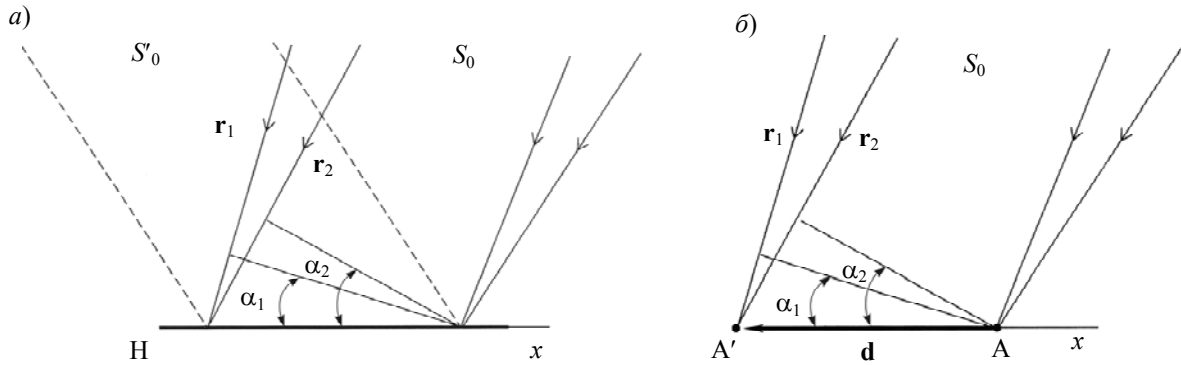


Рис. 1

Пусть вектор \mathbf{r}_1 (рис. 1) определяет исходное направление распространения опорного пучка. При этом разность хода крайних лучей в плоскости голограммы равна

$$\Delta_1 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{r}_1.$$

Пусть вектор \mathbf{r}_2 характеризует новое случайное направление распространения опорного пучка. Соответствующая разность хода составит

$$\Delta_2 = \mathbf{D} \cdot \mathbf{r}_2.$$

Изменение разности хода крайних лучей опорного пучка при его отклонении в плоскости голограммы определяется как разность

$$\begin{aligned} \delta &= \Delta_2 - \Delta_1 = \mathbf{D} \cdot (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) = D r_{2x} - D r_{1x} = D \sin \alpha_2 - D \sin \alpha_1 = \\ &= 2D \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \sin \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{1,2}$ — соответствующие углы падения опорного пучка на голограмму.

Будем считать, что случайное отклонение опорного пучка достаточно мало, тогда

$$\delta = 2D \Delta\alpha \cos \alpha, \tag{1}$$

где $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ — изменение угла падения опорного пучка, α — средняя величина угла падения.

Найденное изменение разности хода лучей для одного из опорных пучков при регистрации (восстановлении) голограммы трансформируется в идентичный набег фазы по апертуре освещающего (опорного или восстанавливающего) пучка для объектной волны [9—13].

Произведем количественную оценку этого фазового набега. Пусть $\lambda = 0,63$ мкм, $D = 10$ мм,

$\Delta\alpha = 10^{-5}$ рад, $\alpha = \frac{\pi}{4}$, тогда погрешность определения фазы интерференционных полос

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi 2D \Delta\alpha \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,7}{0,63 \cdot 10^5} = 2\pi \cdot 0,22.$$

Таким образом, отклонение одного из опорных пучков на $\sim 10^{-5}$ рад приведет к фазовому набегу объектной волны на 0,22 доли интерференционной полосы. Ясно, что для гетеродинных методов измерений, претендующих на точность порядка сотых и даже тысячных долей полосы, найденная погрешность является неприемлемой.

Интерферометрия сдвига. Применение интерферометра сдвига для настройки интерференционных полос позволяет реализовать принцип гетеродинной интерферометрии [9—13], используя лишь один опорный пучок. Поэтому изменение направления распространения опорной (восстанавливающей) волны приведет к пространственному смещению интерференционных полос за счет изменения разности фаз интерферирующих объектных волновых фронтов. Следовательно, для количественной оценки возникающей при этом погрешности фазовый набег необходимо определять на длине вектора смещения идентичных элементов поверхности исследуемого объекта (рис. 1, б). Для оценки погрешности примем величины параметров, входящих в (1): $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, $d = 100 \text{ мкм}$, $\Delta\alpha = 10^{-5} \text{ рад}$, $\alpha = \frac{\pi}{4}$, тогда

$$\delta\varphi = 2\pi \cdot 0,22 \cdot 10^{-2}.$$

Таким образом, использование интерферометра сдвига для реализации принципа гетеродинной интерферометрии, а также для настройки интерференционных полос позволяет использовать лишь один опорный пучок и при прочих равных условиях на два порядка повышает точность измерений по сравнению с двухопорной голографической интерферометрией.

Использование интерферометра поперечного сдвига. Определить возможность применения интерферометра можно, проанализировав разность хода интерферирующих лучей.

Из соображений простоты конструкции и изготовления, надежности, виброустойчивости и отсутствия проблем при оптической юстировке в работе используется интерферометр Жамена (рис. 2). Параллельное исходное положение пластин характеризуется нулевой разностью фаз интерферирующих лучей.

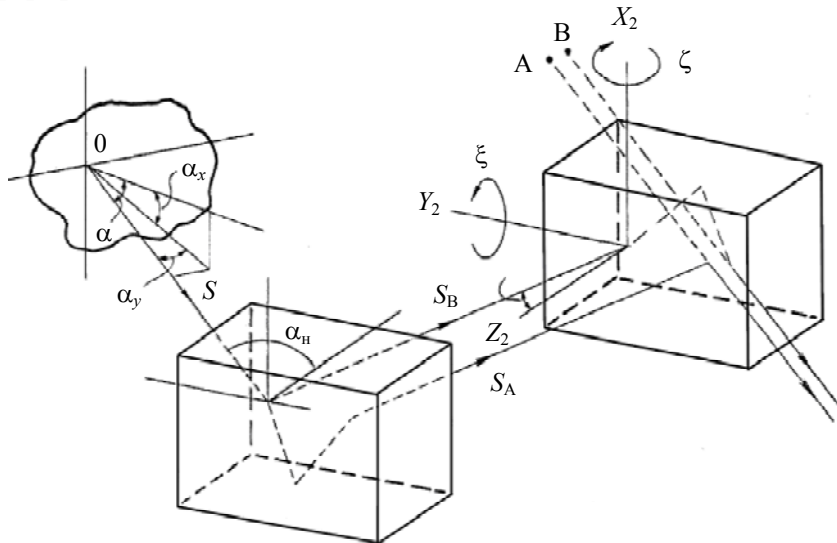


Рис. 2

Сдвиг в разность фаз, а также в пространственное положение соответственных элементов А и В вносится посредством взаимного наклона пластин интерферометра, причем угол наклона характеризуется величиной ξ — при наклоне пластины I относительно оси Y_2 , и величиной ζ — при наклоне относительно оси X_2 . Амплитуда сигнала на выходе интерферометра (при настроенном интерферометре) 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 компенсирована разностью хода, вносимой интерферометром, для всех точек поля интерференции. Отсюда возникает падение амплитуды сигнала при увеличении измеряемого смещения. Кроме того, вектор сдвига, вносимого интерферометром, может быть по-разному ориентиро-

ван относительно плоскости расположения соответственных элементов (или их изображений) в зависимости от осей наклона пластин интерферометра.

С целью графической интерпретации приведем следующее выражение:

$$\varphi_{\text{и}}(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) = \varphi_1(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) - \varphi_2(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta),$$

где ξ, ζ — углы наклона второй пластины интерферометра вокруг осей Y_2 и X_2 соответственно; $\varphi_{1,2}(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta)$ — разность фаз лучей на выходе первой и второй пластин интерферометра;

$$\varphi_2(\alpha_x, \alpha_y, \xi, \zeta) = \frac{4\pi n h}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2(\alpha_x + \xi) + \text{tg}^2(\alpha_y + \zeta) \frac{\cos^2 \alpha_x}{\cos^2(\alpha_x + \xi)}}{n^2 \left[\text{tg}^2(\alpha_x + \xi) + \text{tg}^2(\alpha_y + \zeta) \frac{\cos^2 \alpha_x}{\cos^2(\alpha_x + \xi)} \right]}}$$

n — показатель преломления пластины интерферометра, h — ее толщина.

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

При наклоне пластины II относительно Y_2 имеем

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

На рис. 3 иллюстрируется изменение фазового сдвига (*a*) и его производной (*б*), вносимое интерферометром, по угловой апертуре интерференционного поля при наклоне пластины интерферометра (1 — относительно оси Y_2 , 2 — относительно оси X_2).

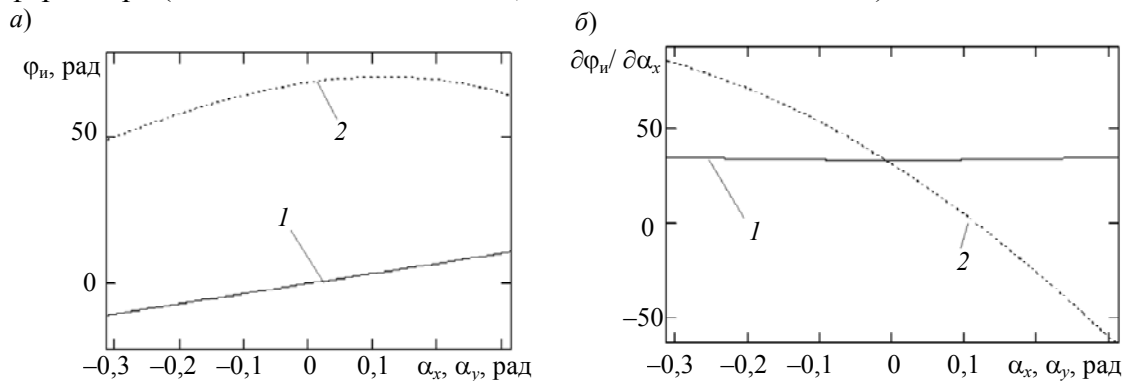


Рис. 3

Зависимость $\varphi_{\text{и}}$ от α_x , как следует из рис. 3, *a*, достаточно прямолинейна на участке, значительно превышающем практически используемую апертуру наблюдения $2\alpha_{\text{н}}$. Производная $\partial\varphi_{\text{и}}/\partial\alpha_x$ (рис. 3, *б*) постоянна на этом участке.

В случае вращения пластины II относительно X_2 зависимость разности фаз и производной от угла α_y существенно нелинейна, что приводит к деформации интерференционного поля и погрешности считывания информации. Результаты анализа подтверждают правильность выбора оси наклона пластины интерферометра вокруг оси Y_2 , сформулированного [9—13] на основании приближенных оценок.

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

Максимальная величина измеряемого смещения. Нелинейность зависимости разности фаз выходных лучей интерферометра в пределах апертурного угла наблюдения приводит к деформации интерференционного поля и как следствие — падению амплитуды выходного

сигнала. Поэтому для определения верхней границы диапазона измерений необходимо рассмотреть зависимость амплитуды выходного сигнала от угла наклона пластины интерферометра ξ (рис. 4, а):

$$U = \int_{-\alpha_H}^{\alpha_H} \cos[\varphi_H(\alpha_x, \alpha_y, \xi)] d\alpha_x,$$

В процессе измерений вектора смещения интерферометр настраивается таким образом, что

$$\varphi_H(\alpha_x, \xi) = \varphi(\alpha_x, d),$$

где $\varphi_H(\alpha_x, \xi)$ — разность фаз лучей, вносимая интерферометром; $\varphi(\alpha_x, d)$ — разность фаз лучей от соответственных элементов поверхности при восстановлении изображения объекта с голограммы.

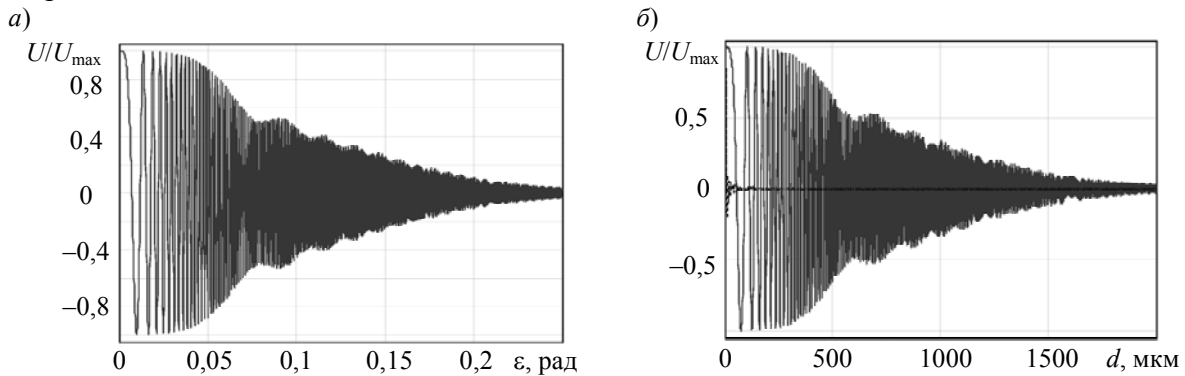


Рис. 4

Поскольку интерферометр сдвига настраивается по максимуму величины выходного сигнала, определяемому минимально возможным градиентом фазы составляющей по эффективной апертуре фотоприемника, связь между величиной смещения и углом наклона будет описываться выражением

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

Графическая зависимость амплитуды выходного сигнала от величины смещения представлена на рис. 4, б. 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. 4, б следует, что верхняя граница диапазона измерений величины вектора смещения 1,5 мм.

Минимальная величина измеряемого смещения. Погрешность определения вектора смещения определяется следующим выражением:

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

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 можно получить следующую оценку: при $\lambda = 0,63$ мкм $\alpha_0 = 0,1$ рад, $d \approx 0,01$ мкм.

Заключение. Выполнена количественная оценка различных способов настройки интерференционных полос. Показаны недостатки процесса настройки полос с использованием двух опорных пучков при записи и восстановлении голограммы. Исследованы особенности использования интерферометрии сдвига для настройки параметров интерференционного поля.

Установлено, что верхний предел измеряемой величины вектора смещения определяется величиной выходного сигнала, обусловленного возрастающей деформацией интерференционного поля при увеличении смещения. На нижний предел измерений решающее значение оказывает несоответствие фазы измеряемого сигнала фазе интерференционных полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Powell R. L., Stetson K. A. Interferometric analysis by wavefront reconstruction // J. Opt. Soc. Am. 1965. Vol. 55. P. 1593—1599.
2. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. 1967. Т. 37, вып. 2. С. 360—365.
3. Пат. 2289098 РФ. Способ определения деформаций диффузно отражающих объектов / О. П. Большаков, И. Р. Котов, Е. Е. Майоров, О. В. Майорова, В. Т. Прокопенко, В. В. Хопов. 2006. Бюл. 34.
4. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. 2012. № 7(145). С. 23—25.
5. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2(78). С. 13—16.
6. Majorov E. E., Prokopenko V. T. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // Biomedical Engineering. 2012. Vol. 46, N 3. P. 109—111.
7. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 38—46.
8. Майоров Е. Е. Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 329—332.
9. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Sherstobitova A. S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // J. of Optical Technology. 2013. Vol. 80, N 3. P. 162—165.
10. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 193 с.
11. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306.
12. 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. 2015. № 11(185). С. 26—31.
13. 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.

Сведения об авторах

- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра световых технологий и оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Александр Чеславович Машек** — Военно-морской политехнический институт, г. Пушкин, кафедра физики; преподаватель; E-mail mashek50@mail.ru
- Галина Александровна Цыганкова** — канд. физ.-мат. наук Военно-морской политехнический институт г. Пушкин, кафедра физики; преподаватель; E-mail galusinka@mail.ru
- Володя Казаросович Абрамян** — д-р техн. наук, профессор; Военная академия связи им. С. М. Буденного, кафедра физики; E-mail: Vilik1940@gmail.com
- Юрий Евгеньевич Зайцев** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), кафедра физики; E-mail: wwwphys@hotbox.ru

- Андрей Геннадьевич Хайдаров** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра бизнес-информатики; E-mail andreyhaydarov@gmail.ru
- Геннадий Геннадьевич Хайдаров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра инженерного проектирования; E-mail haidarovg@gmail.ru

Рекомендована кафедрой
световых технологий и
оптоэлектроники

Поступила в редакцию
20.10.16 г.

Ссылка для цитирования: Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е., Хайдаров А. Г., Хайдаров Г. Г. Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографии для контроля геометрических параметров диффузно отражающих поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 331—339.

APPLICATION OF CROSS-SHEAR INTERFEROMETRY IN HOLOGRAPHY FOR CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF DIFFUSE-REFLECTING SURFACES

V. T. Prokopenko¹, E. E. Maiorov², A. C. Mashek³, G. A. Tsygankova³,
V. K. Abramian⁴, Yu. E. Zaitsev⁵, A. G. Khaidarov⁶, G. G. Khaidarov⁶

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

² St. Petersburg University of Management Technologies and Economics,
190103, St. Petersburg, Russia

³Naval Polytechnical Institute, 196604, Pushkin, Russia

⁴S. M. Budyonny Military Academy of Telecommunications, 194064, St. Petersburg, Russia

⁵St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, St. Petersburg, Russia

⁶St. Petersburg State Technological Institute (technical university),
190013, Санкт-Петербург, Россия

Various methods of interference fringes tuning are evaluated. The features of two-beam holographic registration and reconstruction of the original and perturbed states of a diffuse reflecting surface are considered. Quantitative assessment of measurement error is carried out; the deviation of one of the supporting beams at 10^{-5} rad is shown to lead to phase shift of the object wave for 0,22 of the interference fringe and to the error in the phase of the interference fringe $\delta\varphi = 2\pi \cdot 0,22$. The possibility of applying shear interferometry instead of two-beam interferometry allows to use a single reference beam and thus improve the measurement accuracy for two orders of magnitude. The phase difference between the beams at the output of transverse shear interferometer (Jamin interferometer) is analyzed. The result allows to estimate the measuring range of the displacement vector magnitude; the maximum and the minimum value of the measured offset are determined to be 1,5 mm and 0,01 μm respectively.

Keywords: holographic interferometry, phase shift of light wave, diffuse-reflecting surface, Jamin interferometer, transverse shear interferometer, measuring range of displacement vector magnitude

Data on authors

- Victor T. Prokopenko** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Department of Light Technologies and Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru
- Alexander C. Mashek** — Naval Polytechnical Institute, Pushkin, Department of Physics; Lecturer; E-mail mashek50@mail.ru
- Galina A. Tsygankova** — PhD; Naval Polytechnical Institute, Pushkin, Department of Physics; Lecturer; E-mail galusinka@mail.ru
- Volodia K. Abramian** — Dr. Sci., Professor; S. M. Budyonny Military Academy of Telecommunications, Department of Physics; E-mail: Vilik1940@gmail.com
- Yury E. Zaitsev** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Department of Physics; E-mail: wwwphys@hotmail.ru

- Andrey G. Khaidarov** — PhD; St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Department of Business Informatics; E-mail andreyhaydarov@gmail.ru
- Gennady G. Khaidarov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Engineering Design; E-mail haidarovg@gmail.ru

For citation: Prokopenko V. T., Maiorov E. E., Mashek A. C., Tsygankova G. A., Abramian V. K., Zaitsev Yu. E., Khaidarov A. G., Khaidarov G. G. Application of cross-shear interferometry in holography for control of geometric parameters of diffuse-reflecting surfaces // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 4. P. 331—339 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-331-339