

УДК 681.7

EDN: DYETSI

© Е. Е. Майоров, 2026

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СДВИГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВОГО СМЕЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА

Настоящая работа посвящена исследованию разработанной интерференционной установки контроля угловых смещений точек поверхности объекта на высокоразрешающих голографических пластинках. Методы голографической интерферометрии являются высокоточными и высокоинформативными методами измерений и позволяют проводить исследования процессов как в статике, так и в динамике, изучать поверхности высокополированные и грубой формы (первого, второго класса шероховатости), вести контроль волновых полей, существовавших в разное время, а также получать данные эксперимента в количественном и качественном аспектах. В работе оценен шаг интерференционных полос для проведения измерений, предложена методика устранения наклонных смещений поверхности и приведена функциональная схема разработанного устройства. Получено выражение для интерференционных полос, различимых на фоне оптического шума, для проведения реального эксперимента.

Ключевые слова: интерферометрия сдвига, голографическая пластинка, оптический шум, интерференционные полосы, оптические элементы, фокусное расстояние, угловое смещение, линейное смещение, диафрагма

ВВЕДЕНИЕ

Измерение всегда являлось познанием материального мира, его закономерных связей, находящихся в природе, наблюдаемых объектов и явлений. Реальные модели процессов, окружающих нас, были получены и описаны в процессе исследований объектов и сред благодаря бурному развитию методов измерений. Современные достижения науки и техники неразрывно связаны с измерениями, т.к. измерения устанавливают количественные соотношения, закономерности свойств изучаемых объектов. Поэтому развитие научных направлений всегда связано с измерениями. От пороговой чувствительности, точности измерений зависит реальная картина окружающего нас мира [1–3].

Новые способы, методики, методы для исследования объектов, сред, процессов всегда способствуют подъему производств [4–6]. Оптические измерения всегда занимали ведущие места в получении значимых данных для метрологического обеспечения, медицины, оптического приборостроения и т.д. [7–10]. Их чувствительность и точность находятся на уровне длины волны используемого излучения. А современные оптико-информационные системы и технологии, в которых используются новейшая электроника и компьютеры, позволяют измерять с повышенной точностью и чувствительностью, в десятки раз превышающими точность и чувстви-

тельность классических оптических методов и средств [10–13]. Хотелось бы отметить уникальные свойства оптических измерений — наглядность, убедительность и надежность.

Существует большое количество оптических методов измерений, но наиболее востребованными в этом направлении являются методы когерентной оптики, а именно методы голографической интерферометрии [14, 15]. Методы голографической интерферометрии являются высокоточными и высокоинформативными методами измерений. Экспериментаторы отмечают тот факт, что они позволяют проводить исследования процессов как в статике, так и в динамике, изучать поверхности высокополированные и грубой формы (первого, второго класса шероховатости), вести контроль волновых полей, существовавших в разное время, а также получать данные эксперимента в количественном и качественном аспектах [16, 17]. Поэтому оптические исследования и измерения занимают ведущие места в науке и технике.

На сегодняшний день в голографической интерферометрии достигнуты большие успехи в методах регистрации изображений, анализе полученных результатов эксперимента, а также в оптической обработке голографических изображений [18, 19]. Анализ научной литературы показал, что решены вопросы жестких требований к стабильности геометрии схем воспроизведения

изображений, настройки интерференционных полос в технике двухпорной голографии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе интерес представляет исследование разработанного интерференционного устройства контроля угловых смещений рассеянной световой волны.

Цель работы состояла в применении интерферометрии сдвига для измерения отклонений поверхности объекта от первоначального состояния.

Оценить шаг интерференционных полос для проведения измерений. Предложить методику устранения наклонных смещений поверхности и привести функциональную схему устройства. Получить выражение для интерференционных полос, различимых на фоне оптического шума.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования была разработанная интерференционная установка. Функциональная схема установки приведена на рисунке. Данная установка позволяет устранять изменения волновых фронтов от негладких поверхностей, записанных на голограмме в разные моменты времени.

Для выявления данных об измененной поверхности использовался интерференционный метод настраиваемого сдвига.

В отличие от классических интерферометров (Тваймана – Грина, Ньютона, Физо и т.д.) в сдвиговой интерферометрии (интерферометры Мерти, Жамена, сдвиг по схеме Майкельсона и т.д.) нет необходимости использовать некоторый оптический элемент — эталон. Интерферометрия сдвига широко используется для изучения оптических деталей, систем, а также при контроле потоков и диффузии в газах и жидкостях.

Интерференционный метод настраиваемого сдвига и работа соответствующих приборов основана на сложении волновых фронтов, получаемых из одного деформированного фронта, т.е. при небольшом смещении искаженного фронта волны и получении интерференционной структуры между ним и исходным волновым фронтом. В диапазоне наложения этих волновых фронтов возникает интерференционная картина. Сдвиг или смещение может быть разного характера (радиальным, поворотным, боковым и зеркально или центрально реверсивным). Экспериментаторы отмечают, что полученная интерференционная структура бокового сдвига дает возможность с высокой точностью представлять размытость изображения (расфокусировку).

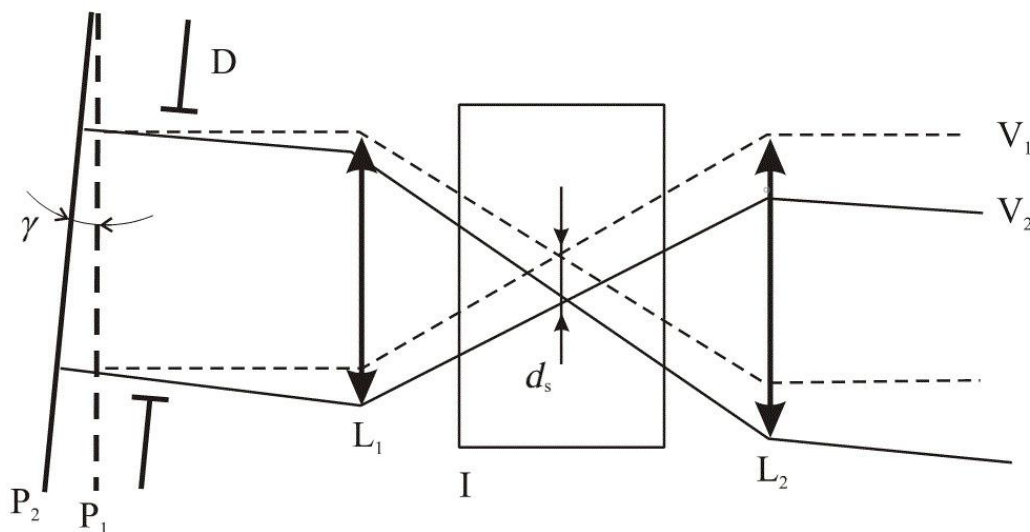


Рис. Реализация интерференционного метода настраиваемого сдвига.

P_1 — исходное положение точек поверхности, P_2 — отклоненное положение точек поверхности, L_1 и L_2 — оптические элементы, I — интерферометр сдвига, D — диафрагма, V_1 и V_2 — выходные световые волны, d_s — величина линейного смещения

В этом методе появляется возможность получать отличные от классических интерференционных структур интерференционные картины с учетом перекрестной интерферометрии. Этот метод привлекает своей малой чувствительностью к вибрациям, прост в эксплуатации, а приборы, реализованные на этом методе, имеют относительно малые размеры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Любой эксперимент над сложной поверхностью практически всегда сопровождается изменениями положения точек поверхности — высоты неровностей профиля и среднеарифметического отклонения профиля. При небольшом отклонении точек поверхности вне плоскости интерференционная структура изображения либо становится сильно размытой, либо вообще исчезает на фоне оптического шума. Когда точки поверхности объекта отклоняются на определенный угол γ , то рассчитать шаг интерференционных полос можно по следующей формуле:

$$x_i = \frac{\lambda}{\gamma}, \quad (1)$$

где x_i — шаг, λ — длина световой волны, γ — угол отклонения точек поверхности от исходного состояния.

В эксперименте отклонение было 10 мкм на 1 см, $\lambda = 0.633$ мкм и $\gamma = 10^{-3}$ рад, а $x_i = 0.633$ мм. Это означает, что при таком значении шага интерференционных полос полосы просто будет невозможно различить на фоне оптического шума.

В работе применили интерференционный метод настраиваемого сдвига для компенсации отклонения точек поверхности.

На рис. приведена реализация данного метода.

На высокоразрешающей голографической пластинке были записаны два положения изображений поверхности объекта. На рис. виден угол γ при освещении поверхности в положениях P_1 и P_2 . Оптический элемент L_1 преобразует угловое отклонение в линейное смещение d_s , а интерферометр сдвига I изменяет величину этого отклонения, компенсируя тем самым наклон поверхности. Поэтому появляется возможность либо изменять взаимное расхождение выходных световых волн V_1 и V_2 , либо полностью устранять отклонение точек поверхности объекта.

Для величины линейного смещения d_s можно получить расчетную формулу, зная фокусное расстояние f оптического элемента L_1 , γ и угол освещения поверхности θ :

$$d_s = f(1 + \cos \theta)\gamma. \quad (2)$$

Эта формула показывает взаимосвязь γ и d_s . Диафрагма D выделяет часть поверхности при сдвиге записанного изображения поверхности на голограмме. Размер выреза на диафрагме выделяет область поверхности, а программное обеспечение служит, чтобы представлять на экране дисплея среднее значение вектора смещения. Максимальный размер смещения точек выреза на диафрагме должен быть в пределах градиента вектора смещения. Итак, контрастная структура интерференционной картины будет различима при условии, когда $(i + 1)$ -я полоса при $d_{\max}$ не будет перекрываться i -й полосой при $d_{\min}$ ($d_{\max}$ и $d_{\min}$ — максимальная и минимальная величины смещения точек выреза).

Поэтому должно выполняться соотношение:

$$\frac{z\lambda(i+1)}{d_{\max}} > \frac{z\lambda i}{d_{\min}}, \quad (3)$$

где z — расстояние от диафрагмы D до фотоприемного устройства, $d_{\max}$ и $d_{\min}$ — максимальная и минимальная величины смещения точек, i — порядок интерференционной полосы.

Итак,

$$i = \beta \frac{d_{\min}}{\lambda},$$

$$d_{\max} = d_{\min} + \tau D,$$

где β — угол наблюдения, $\lambda/d_{\min}$ — угловой период полос, τ — отклонение поверхности, D — размер щели на диафрагме. Максимальный размер щели диафрагмы описывается следующим выражением:

$$D_{\max} < \frac{\lambda}{\beta} \tau.$$

Если вычисляемый размер щели меньше щели на диафрагме, то оптический шум имеет максимальное значение. А значит, этот размер будет ограничен величиной оптического шума и интерференционная картина будет иметь максимальный контраст при $d_{\min} > 1.22d_s$.

При конструировании интерференционных устройств сдвига достаточно подобрать такую щель на диафрагме, чтобы можно было визуально наблюдать четкий контраст интерференционных полос.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено описание интерференционного устройства сдвига для измерения смещений

точек поверхности объекта от исходного состояния. Рассмотрена методика устранения угловых отклонений поверхности сложной формы в методе голографической интерферометрии. Получено выражение (1) для шага интерференционных полос при условиях, приведенных в работе. Дано выражение (2) для линейного смещения, которое позволяет рассчитать угловое смещение точек поверхности объекта по величине линейного смещения. Выведено соотношение (3) для существования интерференционных полос. Данная работа представляет интерес для оптического приборостроения, в частности, голографической интерферометрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харт Х. Введение в измерительную технику / Пер. с нем. М.М. Гельмана. М.: Мир, 1999. 389 с.
2. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / Пер. с англ. Е.В. Воронова и А.Л. Лариной. М.: Постмаркет, 2000. 350 с. URL: <https://libcats.org/book/1238419>
3. Лячев В.В., Сирая Т.Н., Довбета Л.И. Фундаментальные основы метрологии. СПб: ЭЛМОР, 2007. 420 с.
4. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Макалары. Пер. с англ. под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
6. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // Оптико-механическая промышленность. 1973. № 8. С. 50–55.
7. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
8. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 295 с.
9. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 193 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26861420>
10. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 13–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17755116>
11. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17910855>
12. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1983. 231 с.
13. 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. URL: <https://opticjourn.ru/ru/abstract/2013-80-3-47-51>
14. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Маишек 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 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 331–339. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-331-339.
15. Костин Г.А., Черняк Т.А., Майоров Е.Е. Экспериментальное исследование фазоизмерительной установки обработки спеклограмм // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 109–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53964277>
16. Майоров Е.Е. К вопросу о погрешности измерений в сдвиговой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18–22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 61–64. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>
17. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Хохлова М.В., Дагаев А.В., Гулиев Р.Б., Таюрская И.С. Экспериментальное определение элементарного смещения в разработанной оптико-электронной системе контроля голографических объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 200–205. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50128359>
18. Майоров Е.Е., Федоренко А.Г., Хохлова М.В., Хайдаров Г.Г., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В. Возможность использования двухчастотного излучения и интерферометра сдвига для реализации оптического гетеродина в голографической интерферометрии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 51–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=adycaw>
19. Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Костин Г.А. Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5. (275). С. 51–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54266626>

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 26.12.2025

APPLICATION OF SHEAR INTERFEROMETRY TO CONTROL THE ANGULAR DISPLACEMENT OF AN OBJECT'S SURFACE

E. E. Maiorov

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg

The present work is devoted to the study of an interference control system for the angular displacement of object surface points on high-resolution holographic plates. Holographic interferometry methods are highly accurate and highly informative measurement methods and make it possible to study processes both in statics and dynamics, can examine highly polished and rough surfaces (of the first and second roughness classes), monitor wave fields that existed at different times, and obtain experimental data in quantitative and qualitative aspects. The paper evaluates the pitch of interference fringes for measurements, suggests a method for eliminating inclined surface displacements, and provides a functional diagram of the developed device. The expression is obtained for interference fringes distinguishable against the background of optical noise for conducting a real experiment.

Keywords: shift interferometry, holographic plate, optical noise, interference fringes, optical elements, focal length, angular displacement, linear displacement, aperture

REFERENCES

- Hart H. *Einführung in die Messtechnik*, 5th ed. Berlin, Verlag Technik Publ., 1989, 379 p. (Russ. ed.: Khart Kh. *Vvedeniye v izmeritel'nyu tekhniku*. M.M. Gel'man (transl.). Moscow, MIR Publ., 1999. 389 p.).
- Klaassen K.B. Electronic measurement and Instrumentation. S.M. Gee (transl. from Dutch). Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1996, 335 p. (Russ. ed.: Klaassen K.B. *Osnovy izmereniy. Elektronnyye metody i pribory v izmeritel'noy tekhnike*. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 350 c.). URL: <https://libcats.org/book/1238419>
- Lyachnev V.V., Siraya T.N., Dovbeta L.I. *Fundamental'nyye osnovy metrologii* [Fundamental principles of metrology]. St. Petersburg, Elmor Publ., 2007. 420 p. (In Russ.).
- Malakara D. (ed.). *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'*. A.N. Sosnov (transl.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p. (In Russ.).
- Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskiye izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
- Dukhopel I.I., Fedina L.G. [Interference methods and devices for monitoring the correctness of the shape of spherical surfaces]. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* [Optical-mechanical industry], 1973, no. 8, pp. 50–55. (In Russ.).
- Zakharyevsky A.N. *Interferometry* [Interferometers]. Moscow, Oborongiz Publ., 1952. 296 p. (In Russ.).
- Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976, 295 p. (In Russ.).
- Prokopenko V.T., Maiorov E.E. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh objektov* [Interferometry of diffusely reflecting objects]. Saint Petersburg, ITMO Publ., 2014. 195 p. (In Russ.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Dynamic parameters optimization for trigger type optical-probe]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2012, no. 2 (78), pp. 13–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17755116> (In Russ.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Calculation of scanning parameters of the interferometric system for controlling the shape of diffusely reflecting objects]. *Pribory* [Instruments], 2012, no. 7 (145), pp. 23–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17910855> (In Russ.).
- Ivanova T.A., Kirillovsky V.K. *Proyektirovaniye i kontrol' optiki mikroskopov* [Design and control of microscope optics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 231 p. (In Russ.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. [Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 3, pp. 47–51. URL: <https://opticjourn.ru/ru/abstract/2013-80-3-47-51>. (In Russ.).
- Prokopenko V.T., Mayorov E.E., Mashek A.C., Tsygankova G.A., Abrahamyan 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]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2017, vol. 60, no. 4, pp. 331–339. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-331-339. (In Russ.).
- Kostin G.A., Chernyak T.A., Mayorov E.E. [Experimental study of a phase-measuring installation for processing specklograms]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State

University. Technical sciences], 2023, vol. 4, pp. 109–112. (In Russ.).

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53964277>

16. Maiorov E.E. [On the issue of measurement error in shear interferometry]. *Sb. Dokl. 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modeling and situational quality management of complex systems"], St. Petersburg, SUAI, 2023, pp. 61–64. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>. (In Russ.).
17. Mayorov E.E., Arefyev A.V., Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Guliev R.B., Tayurskaya I.S. [Experimental determination of the elementary displacement in the developed optoelectronic control system of holographic objects]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2022, vol. 12, pp. 200–205. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50128359> (In Russ.).
18. Mayorov E.E., Fedorenko A.G., Khokhlova M.V., Khaidarov G.G., Guliev R.B., Dagaev A.V. [The possibility of using two-frequency radiation and a shift interferometer to implement optical heterodication in holographic interferometry]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2022, vol. 8, pp. 51–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=adycaw> (In Russ.).
19. Maiorov E.E., Cherniak T.A., Kostin G.A. [Application of highly sensitive photographic materials based on silver halides to study the effect of deviations of specklogram substrates on measurement results]. *Pribory* [Instruments], 2023, no. 5 (275), pp. 51–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54266626>. (In Russ.).

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

Article received by the editorial office on 26.12.2025

INTRODUCTION

Measurement has always been a means of understanding the material world, its lawful relationships in nature, and observable objects and phenomena. Real models of the processes surrounding us have been obtained and described through the study of objects and environments thanks to the rapid development of measurement methods. Modern advances in science and technology are inextricably linked to measurement, as measurements establish quantitative relationships and patterns in the properties of the objects being studied. Therefore, the development of scientific fields is always linked to measurement. The real picture of the world around us depends on the threshold sensitivity and accuracy of measurements [1–3].

New methods, techniques, and technology for studying objects, environments, and processes always contribute to the development of production [4–6]. Optical measurements have always occupied a leading place in obtaining significant data for metrological support, medicine, optical instrumentation, etc. [7–10]. Their sensitivity and accuracy correspond to the wavelength of the radiation used. Modern optical information systems and technologies, utilizing cutting-edge electronics and computers, enable measurements with increased accuracy and sensitivity, tens of times greater than those of classical optical methods and instruments [10–13]. It is worth noting the unique properties of optical measurements: clarity, persuasiveness, and reliability.

There are a large number of optical measurement methods, but the most in-demand in this area are coherent optics methods, specifically holographic interferometry [14, 15]. Holographic interferometry methods are highly accurate and highly informative measurement methods. Experimenters note that they enable the study of both static and dynamic processes, the investigation of highly polished and rough surfaces (first and second roughness classes), the monitoring of wave fields that existed at different times, and the acquisition of quantitative and qualitative experimental data [16, 17]. Therefore, optical research and measurements occupy a leading position in science and technology.

Today, significant advances have been made in holographic interferometry in image recording methods, the analysis of experimental results, and the optical processing of holographic images [18, 19]. An analysis of the scientific literature has shown that the strict requirements for the stability of image reproduction circuit geometry and the adjustment of interference fringes in dual-support holography have been resolved.

PROBLEM STATEMENT

The present study focuses on the investigation of a developed interference device for monitoring angular displacements of a scattered light wave.

The objective of the study was to use shear interferometry to measure deviations of an object's surface from its original state.

To estimate the pitch of interference fringes for measurements. To propose a method for eliminating oblique surface displacements and provide a functional diagram of the device. To obtain an expression for interference fringes discernible against background optical noise.

RESEARCH OBJECT AND METHOD

The object of study was the developed interference setup. The functional diagram of the setup is shown in the figure. This setup allows for the elimination of wavefront variations from rough surfaces that are recorded on a hologram at different points in time.

To identify data on the modified surface, a tunable shear interference method was used.

Fig. Implementation of the tunable shear interference method.

P_1 is the initial position of the surface points, P_2 is the deflected position of the surface points, L_1 and L_2 are optical elements, I is the shearing interferometer, D is the diaphragm, V_1 and V_2 are the output light waves, d_s is the linear displacement

Unlike classical interferometers (Twyman-Green, Newton, Fizeau, etc.), in shearing interferometry (Merty, Jamin, Michelson-type interferometers, etc.), there is no need to use a specific optical element—a standard. Shearing interferometry is widely used to study optical components and systems, as well as to monitor flows and diffusion in gases and liquids.

The tunable shear interference method and the operation of the corresponding instruments are based on the summation of wavefronts obtained from a single deformed front, i.e., when there is a slight shift of the distorted wavefront, and the formation of an interference structure between it and the original wavefront. An interference pattern arises in the overlapping range of these wavefronts. The shift or displacement can be of various types (radial, rotational, lateral, and mirror- or centrally reversible). Experimenters note that the resulting lateral shift interference structure makes it possible to accurately represent image blur (defocus).

This method makes it possible to obtain interference patterns different from those obtained with classical interference structures by taking into account

cross-talk interferometry. This method is attractive due to its low sensitivity to vibrations, ease of use, and the devices implemented used are relatively small.

EXPERIMENTAL RESULTS

Any experiment on a complex surface is almost always accompanied by changes in the position of surface points—the height of profile irregularities and the average arithmetic deviation of the profile. With a small deviation of surface points out of plane, the interference structure of the image becomes either very blurred or completely disappears against the background of optical noise. When surface points on an object deviate by a certain angle γ , the pitch of the interference fringes can be calculated using the following formula:

$$x_i = \frac{\lambda}{\gamma}, \quad (1)$$

where x_i is the pitch, λ is the wavelength of light, and γ is the angle of deviation of the surface points from the initial state.

In the experiment, the deviation was 10 μm per 1 cm, $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$, $\gamma = 10^{-3}$ rad, and $x_i = 0.633$ mm. This means that with such a fringe pitch, the fringes will simply be impossible to distinguish against the background optical noise.

In this study, we used an interference method of adjustable shift to compensate for the deviation of surface points.

The figure shows an implementation of this method.

Two positions of the object's surface images were recorded on a high-resolution holographic plate. The figure shows the angle γ when the surface is illuminated at positions P_1 and P_2 . Optical element L_1 converts the angular deviation into a linear displacement d_s , and the shearing interferometer I varies the magnitude of this deviation, thereby compensating for the surface tilt. This makes it possible to either change the mutual divergence of the output light waves V_1 and V_2 or completely eliminate the deviation of the object's surface points.

A calculation formula for the linear displacement d_s can be obtained using the focal length f of the optical element L_1 , γ , and the surface illumination angle θ :

$$d_s = f(1 + \cos\theta)\gamma. \quad (2)$$

This formula shows the relationship between γ and d_s . Diaphragm D isolates a portion of the surface when the surface recorded image is shifted on the hologram. The size of the aperture cutout isolates the surface area, and the software displays the average displacement vector on the display screen. The maximum displacement of the aperture cutout points must

be within the gradient of the displacement vector. Thus, the contrast structure of the interference pattern will be discernible provided that the $(i + 1)$ th fringe at $d_{\max}$ does not overlap the i -th fringe at $d_{\min}$ ($d_{\max}$ and $d_{\min}$ are the maximum and minimum displacements of the cutout points).

Therefore, the following relationship must be satisfied:

$$\frac{z\lambda(i+1)}{d_{\max}} > \frac{z\lambda i}{d_{\min}}, \quad (3)$$

where z is the distance from the aperture D to the photodetector, $d_{\max}$ and $d_{\min}$ are the maximum and minimum values of the point displacement, and i is the order of the interference fringe.

So,

$$i = \beta \frac{d_{\min}}{\lambda},$$

$$d_{\max} = d_{\min} + \tau D,$$

where β is the observation angle, $\lambda/d_{\min}$ is the angular period of the fringes, τ is the surface deviation, and D is the aperture slit size. The maximum slit size is described by the following expression:

$$D_{\max} < \frac{\lambda}{\beta} \tau,$$

If the calculated slit size is smaller than the slit on the aperture, then the optical noise is at its maximum. Therefore, this size will be limited by the optical noise, and the interference pattern will have maximum contrast at $d_{\min} > 1.22d_s$.

When designing interference shift devices, it is sufficient to select a slit on the aperture such that a clear contrast of the interference fringes can be visually observed.

CONCLUSION

This paper describes an interference shift device for measuring the displacement of object surface points from their original state. A technique for eliminating angular deviations on complex surfaces using holographic interferometry is considered. Expression (1) is derived for the pitch of interference fringes under the conditions described in the paper. Expression (2) is given for the linear displacement, which allows one to calculate the angular displacement of object surface points based on the magnitude of the linear displacement. Relation (3) is derived for the existence of interference fringes. This work is of interest for optical instrumentation, particularly holographic interferometry.