

УДК 535.4

© Е. Е. Майоров, Г. А. Костин, Т. А. Черняк, Н. Е. Баранов, 2024

ПРИМЕНЕНИЕ КОНАПРАВЛЕННОЙ СХЕМЫ ЗАПИСИ ИНТЕРФЕРОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

Работа посвящена исследованию перемещений объектов методом голографической интерферометрии по конаправленной схеме. Методы когерентной оптики занимают важное место в оптических измерениях, и одними из самых высокоинформативных и высокоточных методов являются методы голографической интерферометрии, поэтому данная работа актуальна и перспективна. В статье поставлена цель и задачи, а также определены объект и метод исследования. Приведены внешний вид, оптическая схема и технические параметры экспериментальной голографической интерференционной установки. Показаны интерференционные поля для различных видов движений, а также схема воспроизведения интерферограммы после записанных перемещений объекта. Получены результаты перемещений изображения объекта по оси X на 100 мкм и по оси Z на 150 мкм и вычислена относительная погрешность определения d_x и d_z , которая не превышает 5%.

Кл. сл.: интерферограмма, конаправленная схема, фотографические высокоразрешающие пластинки, фокальная плоскость линзы, относительная погрешность, интерференционная полоса

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромное внимание уделяется развитию высокотехнологичных методов и технических средств измерений [1, 2]. Научно-исследовательские организации, центры вынуждены постоянно совершенствовать и развивать научную базу экспериментальных исследований, чтобы не отставать от мирового научно-технического прогресса [3, 4]. Существует широкий класс методов и технических средств контроля, диагностики исследуемых объектов и сред. Одно из ведущих мест занимают оптические методы и средства измерений.

От того, на каком этапе развития находятся методы и средства исследований и измерений (точность, чувствительность, диапазон измерений), зависит достоверность результатов эксперимента, а также естественность представления окружающего мира [5, 6]. Из всех существующих методов измерений одними из самых точных являются оптические и оптико-электронные методы и средства, а именно методы когерентной оптики.

Из научных литературных источников известно, что чувствительность и точность измерений у этих методов находятся на уровне длины волны излучения и имеют диапазон от 1500 мкм до 0.1 мкм [7, 8]. Среди методов когерентной оптики важное место занимают методы голографической

интерферометрии, которые являются высокоинформативным и высокоточным инструментом получения информации.

Методы голографической интерферометрии позволяют исследовать статистические и динамические процессы, сравнивать волновые процессы в разные моменты времени, получать данные о процессе в количественной и качественной интерпретации, позволяют воспроизводить трехмерную видеокопию [9, 10].

С развитием электроники и компьютерных технологий у оптических и оптико-электронных приборов и комплексов появилась возможность увеличить точность и чувствительность измерений в несколько десятков раз [11, 12]. Важность таких приборов и комплексов заключается в том, что они дают наглядность, надежность и убедительность измерениям. Поэтому эти приборы и комплексы применяются в большинстве естественнонаучных и научно-технических направлений, в технической, медицинской и биологической практике.

Представляет интерес изучение метрологических возможностей голографической интерференционной установки для исследования интерферограмм.

Цель работы состояла в применении конаправленной схемы записи интерферограмм для определения элементарного смещения голографической интерференционной установкой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Записать интерферограммы на пластинках высокого разрешения при смещении поверхности объекта вдоль оси OX и вдоль оси OZ . Провести анализ воспроизведенной интерференционной картины для плоскости XZ .

ОБЪЕКТЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования использовался фрагмент отражателя на основе $SiO_2+H_2O+ZnO_2$ с размерами записывающей плоскости 90×90 мм. Для получения интерферограмм применялись пластинки фотографические высокоразрешающие ПФГ-04 на основе бихромированного желатина с размерами 102×102 мм.

Экспериментальная голографическая интерференционная установка используется для исследования интерференционной картины с интерферограммы, где произведена запись в разные моменты времени лазерным излучением ограниченной апертуры. Внешний вид установки показан на рис. 1. Интерференционные полосы определяются установкой, как и в классическом голографическом интерферометре [13–15].

На рис. 2 представлена оптическая схема записи интерферограмм по конаправленной схеме. В эксперименте интенсивности в объектном и опорном каналах были в отношении $1 : 3$, и изменять их возможно было по поляризационному признаку.

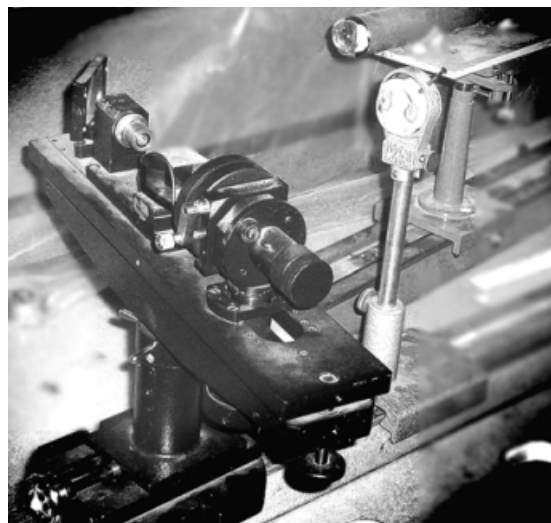


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

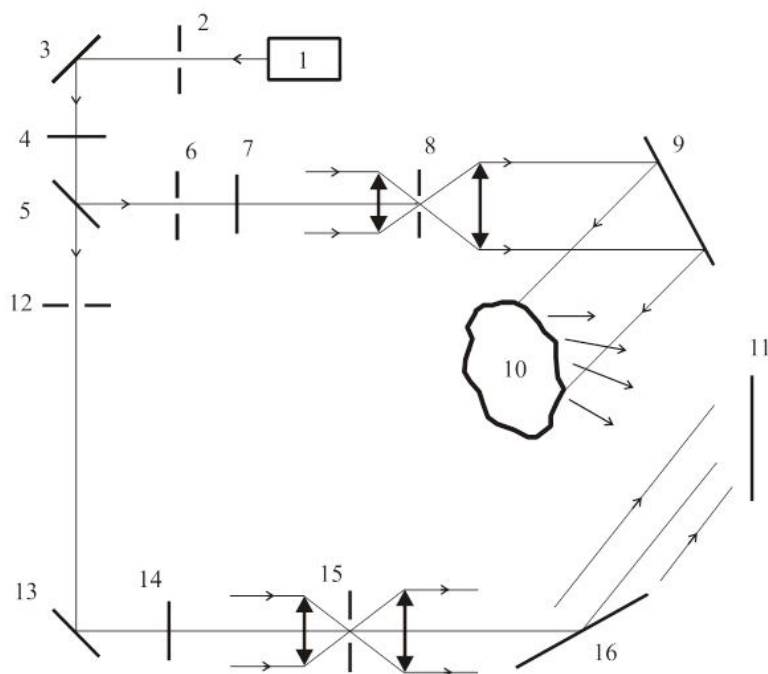


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки.

1 — источник излучения; 2, 6, 12 — оптические отсекатели; 3, 9, 13, 16 — зеркала; 4, 7, 14 — полуволновые пластины; 5 — поляризационный светоделитель; 8, 15 — коллиматоры; 10 — исследуемый объект; 11 — интерферограмма

Табл. Технические параметры

Источник излучения	He-Ne — лазер (ЛГ-79)
Длина волны излучения, мкм	0.6328
Диапазон измерений смещений, мкм	1500...0.01
Апертура освещения, рад	0.1
Погрешность измерений, мкм	0.001

Световой пучок от источника когерентного излучения 1, пройдя световой отсекающий элемент 2 и попадая на зеркало 3, фокусируется на поляризационном светоделителе 5. Светоделитель 5 разводит световой пучок в объектный и опорный каналы, где лучи через полуволновые пластины 7 и 14 попадают в коллиматоры каналов измерений 8 и 15. В объектном канале луч, попадая на зеркало 9 и отражаясь от него, освещает исследуемый объект и регистрирует его на 11 (ПФГ-04). В опорном канале световой пучок направляется на зеркало 16, отражаясь от него, попадает на 11 (ПФГ-04).

Технические параметры экспериментальной установки приведены в таблице.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе эксперимента были записаны интерферограммы на ПФГ-04 исследуемого объекта, где объект передвигался вдоль оси X и вдоль оси Z . Указанные виды движения показаны на рис. 3. Перемещения объекта осуществлялись посредством устройства с микрометрическими подвижками. При записи объект освещался по нормали к поверхности. Записанное интерференционное поле анализировалось для плоскости XZ . Интерференционная картина для такого вида движения локализуется и наблюдается в фокальной плоскости линзы с фокусом f .

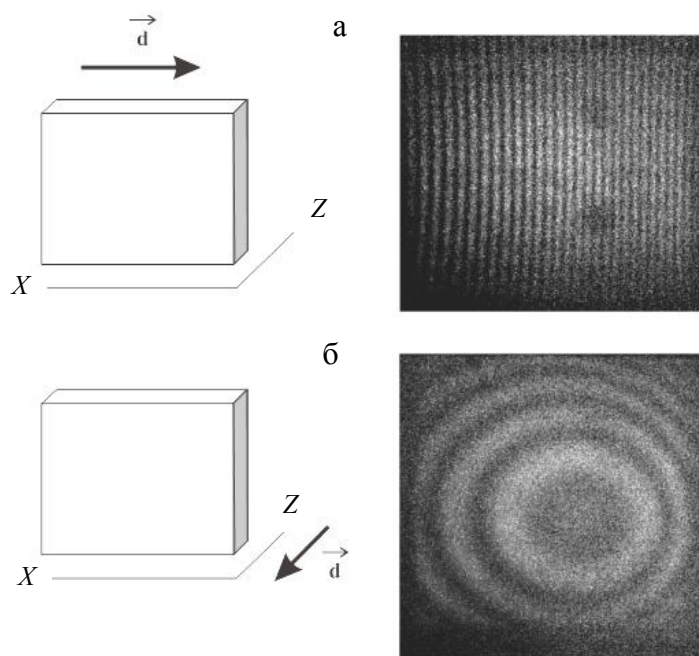


Рис. 3. Интерференционные поля для различных видов движений.
а — движение объекта вдоль оси X на 100 мкм; б — движение объекта вдоль оси Z на 150 мкм

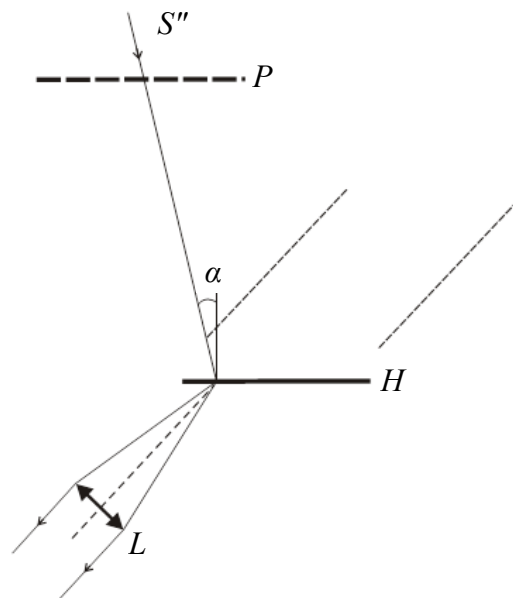


Рис. 4. Схема воспроизведения интерферограммы.
 S'' — восстанавливающий луч; P — записанное изображение; H — ПФГ-04; L — собирающая линза

Рассмотрим движение исследуемого объекта вдоль оси X.

В этом случае $d_z = d_y = 0$, тогда

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d_x r_{Hx} - \varphi_0, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения; d_x — величина смещения объекта вдоль оси X; r_{Hx} — величина, характеризующая направление наблюдения вдоль оси X; φ_0 — фазовый сдвиг, обусловленный направлением освещения объекта.

С учетом (1) для направления наблюдения (рис. 4), характеризуемого углом $\alpha = \alpha_1$, имеем

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \alpha_1 - \varphi_0,$$

где угол α отсчитывается от нормали к вектору смещения.

В соответствии с рис. 4:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \alpha_2 - \varphi_0.$$

Если изображение перемещается на одну интерференционную полосу:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi, \quad d_x = \frac{\lambda}{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1},$$

для малых α :

$$\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \approx \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{X_1}{f},$$

где X_1 — расстояние между интерференционными полосами; f — фокусное расстояние линзы.

Тогда

$$d_x = \frac{\lambda f}{X_1}. \quad (2)$$

При перемещении изображения объекта по нормали для обоих направлений:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \alpha_1 - \varphi_0,$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \alpha_2 - \varphi_0.$$

Если изображение перемещается на одну интерференционную полосу, то

$$d_z = \frac{\lambda}{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}.$$

Итак, при α_2 , соответствующему направлению на центр первого кольца интерференционной картины, и малом α получаем:

$$d_z = \frac{2\lambda}{\alpha^2}.$$

Данную формулу можно представить через радиус первого кольца интерферограммы r_1 , наблюдаемой в фокальной плоскости линзы с фокусом f :

$$\alpha_2 = \frac{r_1}{f}, \quad r_1 = f \cdot \left(\frac{2\lambda}{d_z} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

На практике для измерения перемещений используют пять интерференционных полос или колец, и для расчета перемещений применяют следующие соотношения:

$$d_x = \frac{5\lambda f}{\Delta_x}, \quad (4)$$

$$d_z = f^2 \frac{10\lambda}{r_5^2}, \quad (5)$$

где Δ_x — линейное перемещение в фокальной плоскости линзы.

В эксперименте в качестве независимого метода измерений применялся датчик линейных перемещений 1МИГ с ценой деления шкалы 1 мкм.

Полученные результаты перемещений изображения объекта по оси X на 100 мкм и по оси Z на 150 мкм показаны на рис. 5. Измерения проводились поточечно посредством перемещения интерферограммы в своей плоскости на 90 мм.

Исследование показало, что величины погрешностей δ_x и δ_z зависят от неточности счета полос δ_N . Поэтому, согласно (4) и (5), получим

$$\delta_x = \frac{f\lambda}{\Delta_x} \delta_N, \quad \delta_z = \frac{2f^2\lambda}{r_5^2} \delta_N. \quad (6)$$

Если $N = 5$ и погрешности $\delta_N = 0.25$, из (4), (5) и (6) следует, что относительная погрешность определения d_x и d_z не превышает 5%, как и показано на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С появлением голографической интерферометрии в научной практике были достигнуты большие успехи в записи, воспроизведении и оптической обработке интерферограмм.

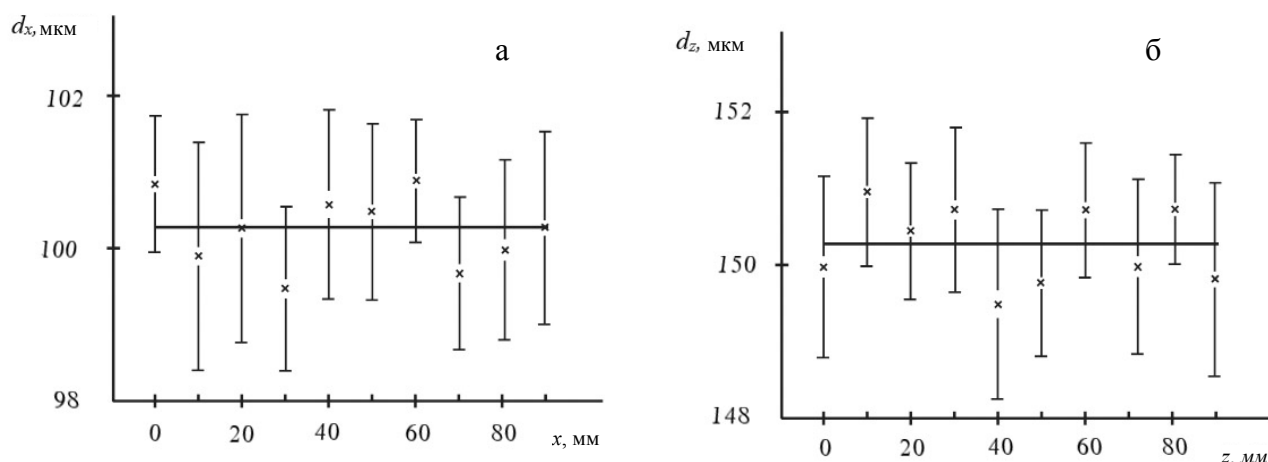


Рис. 5. Экспериментальные результаты измерений перемещений изображения объекта по осям. а — перемещение вдоль оси X на 100 мкм; б — перемещение вдоль оси Z на 150 мкм. Измерения сделаны поточечно посредством перемещения интерферограммы в своей плоскости на 90 мм

В работе получены экспериментальные результаты перемещений изображения объекта по оси X на 100 мкм и по оси Z на 150 мкм. Определен параметр, который вносит основной вклад в погрешность измерений перемещений. Дана количественная интерпретация интерференционного поля, воспроизведенного лазерным лучом с фотографической высокоразрешающей пластинки ПФГ-04.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике / пер. с франц. под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1967. 80 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
5. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
7. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
8. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Майоров Е.Е., Федоренко А.Г., Чабаненко А.В., Хохлова М.В., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В. Исследование геометрии освещения в двухлучевых интерферометрах // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 75–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49521599>
10. Майоров Е.Е. Исследование выходного интерференционного сигнала в фазоизмерительной системе // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18–22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/itzldp>
11. Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Арефьев А.В., Бородянский Ю.М., Дагаев А.В., Гулиев Р.Б. Математическое моделирование интерференционного сигнала на выходе интерферометра для оценки погрешности измерений // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 230–235. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366>
12. 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>
13. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Бородянский Ю.М., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В., Пушкина В.П. Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 313–319. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319

14. 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>
15. Майоров Е.Е., Бородинский Ю.М., Курлов В.В., Таюрская И.С., Пушкина В.П., Гулиев Р.Б. Пространственное микросканирование поверхности плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 688–695. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54476662>

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

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург (Костин Г.А., Черняк Т.А., Баранов Н.Е.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич, majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 12.10.2023

APPLICATION OF A DIRECTIONAL INTERFEROGRAM RECORDING SCHEME TO DETERMINE THE MOVEMENT OF AN OBJECT USING A HOLOGRAPHIC INTERFERENCE INSTALLATION

E. E. Maiorov¹, G. A. Kostin², T. A. Chernyak², N. E. Baranov²

¹*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia*

The work is devoted to the study of object movement using the method of holographic interferometry according to a codirectional scheme. This work is relevant and promising because coherent optics methods play a significant role in optical measurements, and holographic interferometry methods are among the most highly informative and high-precision approaches. The article sets the goal and objectives as well as defines the object and method of research. The appearance, optical scheme, and technical parameters of an experimental holographic interference installation are given. Interference fields for various types of movements are shown, as well as a scheme for reproducing an interferogram after recording object movements. The results of moving the object image along the X axis by 100 microns and along the Z axis by 150 microns were obtained, and the relative error of determining d_x and d_z , which does not exceed 5%, was revealed.

Keywords: interferogram, condirectional scheme, photographic high-resolution plates, focal plane of the lens, relative error, interference band

REFERENCES

- Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 1st ed. Pergamon Press, 1959. 852 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Translate S.N. Breusa, A.I. Golovashkina, A.A. Shubina, eds. G.P. Motulevich. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
- Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
- Franson M., Slanskii S. *Kogerentnost' v optike* [Coherence in optics]. K.S. Shifrin, ed. Moscow, Nauka Publ., 1967. 80 p. (In Russ.).

4. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p. (In Russ.).
5. Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'* [Optical production control]. A.N. Sosnov, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p. (In Russ.).
6. Afanas'ev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 263 p. (In Russ.).
7. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p. (In Russ.).
8. Akhmanov S.A., D'yakov Yu.E., Chirkin A.S. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 640 p. (In Russ.).
9. Maiorov E.E., Fedorenko A.G., Chabanenko A.V., Khokhlova M.V., Guliyev R.B.O., Dagaev A.V. [Investigation of the geometry of illumination in two-beam interferometers]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2022, iss. 8, pp. 75–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49521599> (In Russ.).
10. Maiorov E.E. [Investigation of the interference output signal in the phase measurement system]. *Sbornik dokladov 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modelling and situational quality management of complex systems"], Saint Petersburg, GUAP, 2023, pp. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/itizldp> (In Russ.).
11. Maiorov E.E., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Dagaev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliyev R.B. [Determination of the optical signal at the output of the photodetector system by direct integration]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2022, iss. 12, pp. 230–235. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366>
12. Maiorov E.E. [On the issue of measurement error in shear interferometry]. *Sbornik dokladov 4 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. 4 All-Russ. conf. "Modelling and situational quality management of complex systems"], Saint Petersburg, GUAP, 2023, pp. 61–64. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/itizldp>
13. Maiorov E.E., Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliyev R.B.O., Dagaev A.V., Pushkina V.P. [Mathematical modeling of the output signal for different photodetector aperture geometries in interference system of interferogram analysis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2023, vol. 66, no. 4, pp. 313–319. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319 (In Russ.).
14. Maiorov E.E., Chernyak T.A., Kostin G.A. [Application of highly sensitive photomaterials based on silver halides to study the influence of speckle substrate deviations on measurement results]. *Pribory* [Instruments], 2023, no. 5 (275), pp. 51–54. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54266626>
15. Maiorov E.E., Borodyansky Yu.M., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S., Pushkina V.P., Guliyev R.B.O. [Spatial microscanning of plane-parallel glass plate surface by the interference method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2023, vol. 66, no. 8, pp. 688–695. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695 (In Russ.).

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

Article received by the editorial office on 12.10.2023

INTRODUCTION

Currently, great attention is paid to the development of high-tech methods and technical measuring instruments [1, 2]. Research organizations and centers are forced to constantly improve and develop the scientific base of experimental research in order to keep up with global scientific and technological progress [3, 4]. There is a wide class of methods and technical means for monitoring and diagnosing the objects and media under study. Measurement tools and optical techniques hold a prominent position.

The stage of development of the methods and means of research and measurement (accuracy, sensitivity, measurement range) affects the reliability of the experimental results as well as the naturalness of the representation of the surrounding world [5, 6]. Of all existing measurement methods, some of the most accurate are optical and optoelectronic methods and means, namely coherent optics methods.

It is known from scientific literature that the sensitivity and measurement accuracy of these methods are at the level of the radiation wavelength and have a range from 1500 μm to 0.1 μm [7, 8]. Among the methods of coherent optics, holographic interferometry methods occupy an important place, they are a highly informative and highly accurate tool for obtaining information.

Holographic interferometry methods allow one to study statistical and dynamic processes, compare wave processes at different points in time, receive data about the process in quantitative and qualitative interpretation, allow you to reproduce a three-dimensional video copy [9, 10].

With the development of electronics and computer technology, optical and optoelectronic devices and complexes have the opportunity to increase the accuracy and sensitivity of measurements several tens of times [11, 12]. The importance of such devices and complexes lies in the fact that they provide clarity, reliability, and persuasiveness to measurements. Therefore, these devices and complexes are used in most natural sciences, technical areas, and medical and biological practice.

The metrological capabilities of a holographic interference setup for the study of interferograms are an interesting area of research.

The purpose of the work was to use a codirectional scheme for recording interferograms to determine the elementary displacement with a holographic interference installation.

FORMULATION OF THE PROBLEM

Record interferograms on high-resolution plates when the object surface is displaced along the OX axis

and along the OZ axis. Analyze the reproduced interference pattern for the XZ plane.

OBJECTS AND METHOD OF RESEARCH

The object of study was a fragment of a reflector based on $\text{SiO}_2+\text{H}_2\text{O}+\text{ZnO}_2$ with recording plane dimensions of 90×90 mm. To obtain interferograms, high-resolution photographic plates $\Pi\Phi\Gamma-04$ with dimensions 102×102 mm based on dichromated gelatin were used.

An experimental holographic interference setup is used to study the interference pattern of an interferogram, which was recorded by laser radiation of a limited aperture at different times. The appearance of the setup is shown in Fig. 1.

Fig. 1. Appearance of the experimental setup

The interference fringes are set by the installation, as in a classical holographic interferometer [13–15].

Fig. 2 shows the codirectional optical scheme for recording interferograms. In the experiment, the intensities in the object and reference channels were in the ratio 1:3, and it was possible to change them according to the polarization feature.

Fig. 2. Optical diagram of the experimental setup.

1 — radiation source; 2, 6, 12 — optical cutters; 3, 9, 13, 16 — mirrors; 4, 7, 14 — half-wave plates; 5 — polarization beam splitter; 8, 15 — collimators; 10 — object under study; 11 — interferogram

The light beam from the coherent radiation source 1, after passing the light cutter 2 and hitting the mirror 3, is focused on the polarization beam splitter 5. The beam splitter 5 separates the light beam into the object and reference channels, where the rays enter the collimators of measurement channels 8 and 15 through half-wave plates 7 and 14. In the object channel, the beam, falling on mirror 9 and reflecting from it, illuminates the object under study and records it on 11 ($\Pi\Phi\Gamma-04$). In the reference channel, the light beam is directed to mirror 16, reflects from it, and hits 11 ($\Pi\Phi\Gamma-04$).

The technical parameters of the experimental setup are given in the table.

Tab. Technical specifications

EXPERIMENTAL RESULTS

During the experiment, interferograms were recorded on ПФГ-04 of the object under study, where the object moved along the X axis and along the Z axis. These types of motion are shown in Fig. 3. The motion of the object was carried out using a device with micro-metric movements. During recording, the object was illuminated normal to the surface. The recorded interference field was analyzed for the XZ

Fig. 3. Interference fields for various types of movements.
a — movement of the object along the X axis by $100\ \mu\text{m}$; б — object movement along the Z axis by $150\ \mu\text{m}$

plane. The interference pattern for this type of motion is localized and observed in the focal plane of the lens with focus f .

Let's consider the movement of the object under study along the X axis.

In this case $d_z = d_y = 0$, then

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d_x r_{Hx} - \varphi_0, \quad (1)$$

where λ is the radiation wavelength; d_x is the amount of displacement of the object along the X axis; r_{Hx} is a value characterizing the direction of observation along the X axis; φ_0 is phase shift due to the direction of illumination of the object.

Taking into account (1) for the observation direction (Fig. 4), characterized by the angle $\alpha = \alpha_1$, we have

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \alpha_1 - \varphi_0,$$

where angle α is measured from the normal to the displacement vector.

Fig. 4. Scheme for reproducing an interferogram.
 S'' — reconstruction beam; P — recorded image;
 H — ПФГ-04; L — collecting lens

According to Fig. 4:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \alpha_2 - \varphi_0.$$

If the image moves by one fringe:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi, \quad d_x = \frac{\lambda}{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1},$$

for small α :

$$\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \approx \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{X_i}{f},$$

where X_i is the distance between the interference fringes; f is the focal length of the lens.

Then

$$d_x = \frac{\lambda f}{X_i}. \quad (2)$$

When moving an object image along normal to both directions:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \alpha_1 - \varphi_0,$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \alpha_2 - \varphi_0.$$

If the image moves by one interference fringe, then

$$d_z = \frac{\lambda}{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}.$$

So, for α_2 , corresponding to the direction to the center of the first ring of the interference pattern, and for small α we obtain:

$$d_z = \frac{2\lambda}{\alpha_2^2}.$$

This formula can be represented in terms of the radius of the first ring of the interferogram r_1 , observed in the focal plane of a lens with focus f :

$$\alpha_2 = \frac{r_1}{f}, \quad r_1 = f \cdot \left(\frac{2\lambda}{d_z} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

In practice, five interference fringes or rings are used to measure displacements, and the following formulas are used to calculate displacements:

$$d_x = \frac{5\lambda f}{\Delta_x}, \quad (4)$$

$$d_z = f^2 \frac{10\lambda}{r_5^2}, \quad (5)$$

where Δ_x is linear displacement in the focal plane of the lens.

In the experiment, a 1МИГ linear displacement indicator with a scale division of $1\ \mu\text{m}$ was used as an independent measurement tool.

The obtained results of moving the object image along the X axis by $100\ \mu\text{m}$ and along the Z axis by $150\ \mu\text{m}$ are shown in Fig. 5. Measurements were carried out point by point by moving the interferogram in its plane by $90\ \text{mm}$.

Fig. 5. Experimental results of measuring the movement of an object image along the axes. a — movement along the X axis by $100\ \mu\text{m}$; b — movement along the Z axis by $150\ \mu\text{m}$. Measurements are made point by point by moving the interferogram in its plane by $90\ \text{mm}$

The study showed that the magnitude of the errors δ_x and δ_z depend on the inaccuracy of counting of the bands δ_N . Therefore, according to (4) and (5), we obtain

$$\delta_x = \frac{f\lambda}{\Delta_x} \delta_N, \quad \delta_z = \frac{2f^2\lambda}{r_s^2} \delta_N. \quad (6)$$

If $N = 5$ and errors $\delta_N = 0.25$, it follows from (4), (5) and (6) that the relative error in determining d_x and d_z does not exceed 5%, as shown in Fig. 5.

CONCLUSION

With the advent of holographic interferometry in scientific practice, great advances have been made in the recording, reproducing, and optical processing of interferograms.

The work obtained experimental results of moving the image of an object along the X axis by $100\ \mu\text{m}$ and along the Z axis by $150\ \mu\text{m}$. The parameter that makes the main contribution to the error in displacement measurements has been determined. A quantitative interpretation of the interference field reproduced using a laser beam from a high-resolution photographic plate ПФГ-04 is given.