ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА ПРИ РАБОТЕ В СКАНИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Е. Е. Майоров¹*, А. В. Арефьев¹, Р. Б. Гулиев¹, В. П. Пушкина¹, А. В. Дагаев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

университет итмо

* majorov_ee@mail.ru

² Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Ивангород, Россия

Аннотация. Представлен низкокогерентный интерферометрический зонд, работающий в сканирующем режиме измерений. Получены данные о рельефе поверхности при движении разработанного зонда и изменении разности хода опорного зеркала в плече интерферометра. Представлены функциональная схема оптического измерительного блока, сканирующий режим измерений, проанализирована обработка сигналов с фотоприемных устройств. Получены картина нерегулярных волновых фронтов при падении низкокогерентного излучения на негладкую поверхность, кривая интенсивности интерференционной картины при изменении рельефа поверхности вдоль оси *OZ*, а также результаты измерений амплитуды и огибающая интерференционного сигнала при расфокусировке.

Ключевые слова: интерференционный зонд, профиль, источник белого света, длина когерентности, шероховатость, ветвь интерферометра, амплитуда, огибающая

Ссылка для цитирования: *Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В.* Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда при работе в сканирующем режиме измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.

STUDY OF A LOW-COHERENCE INTERFEROMETRIC PROBE OPERATING IN THE SCANNING MEASUREMENT MODE

E. E. Maiorov^{1*}, A. V. Arefiev¹, R. B. Guliyev¹, V. P. Pushkina¹, A.V. Dagaev²

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* majorov_ee@mail.ru ² Ivangorod Humanitarian and Technical Institute, Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Ivangorod, Russia

Abstract. A low-coherence interferometric probe operating in the scanning measurement mode is presented. Data on the surface relief during the movement of the developed probe and the change in the path difference of the reference mirror in the interferometer arm are obtained. The functional diagram of the optical measuring unit and the scanning measurement mode are described, and the processing of signals from photodetectors is analyzed. A pattern of irregular wave fronts when low-coherence radiation falls on a rough surface, an intensity curve of the interference pattern when the surface relief changes along the *OZ* axis, and the results of measuring the amplitude and the envelope of the interference signal during defocusing are obtained.

Keywords: interferometric probe, profile, white light source, coherence length, roughness, interferometer branch, amplitude, envelop

For citation: Maiorov E. E., Arefiev A. V., Guliyev R. B., Pushkina V. P., Dagaev A. V. Study of a low-coherence interferometric probe operating in the scanning measurement mode. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 790–797 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.

Введение. Для определения высокоточных параметров — абсолютных значений отклонения профиля R_a и наибольшей высоты профиля R_z в пределах базовой длины шероховатой поверхности — используются разные средства и методы: визуальные, контактные, бескон-

[©] Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В., 2024

791

тактные (см. [1-3]; ГОСТ 25142-82). В настоящее время визуальные методы реализованы в компараторах Rugotest, Clemtex и Keane-Tator, точность которых не хуже 50 мкм, а контактные методы — в профилометрах Mahr GmbH, Renishaw, Carl Ziess, точность которых достигает 0,01мкм [4-7].

Бесконтактные методы измерений, к которым относятся оптические и оптико-электронные, используются в научно-технических областях и промышленности [8, 9]. В частности, низкокогерентные интерферометры основаны на детальном анализе света, отраженного от исследуемой поверхности [10, 11]. В работах [8–16] исследуются суперлюминесцентные источники излучения, длина временной когерентности которой составляет 30 мкм, а также рассматривается триггерный режим измерений.

Разработка низкокогерентных интерферометров — новое направление в оптическом приборостроении и активно развивается последние 8-10 лет [14, 15]. Эти измерительные приборы просты в эксплуатации, имеют большой диапазон измерений, высокую точность и быстродействие, что позволяет отнести их к перспективным и актуальным средствам измерений. В [8-16] решены многие вопросы построения и эксплуатационных характеристик данных приборов, а также частично изучена зависимость метрологических параметров от геометрии освещения. В этой связи представляет интерес формирование искомых данных о шероховатости поверхности при электронной обработке сигналов в сканирующем режиме измерений.

Цель настояшей статьи — получение данных о рельефе поверхности при движении разработанного низкокогерентного интерференционного зонда и изменении разности хода опорного зеркала в плече интерферометра. Задачи исследования — проанализировать сканирующий режим измерений зонда и найти величину изменения рельефа для *i*-й точки относительно базовой поверхности; получить данные о шероховатости поверхности, обработав сигналы фотоприемников; экспериментально выявить изменение амплитуды сигнала при движении зондирующего луча по поверхности объекта.

Метод и объект исследования. Поскольку исследованию подлежал разработанный низкокогерентной интерференционный зонд (далее — зонд), то определение зависимостей шероховатости поверхности от технических характеристик зонда не изучалось. Поэтому в качестве объекта использовался корпус высокочастотного разъема, изготовленный из литейной латуни и покрытый хромом (30 мкм), поверхность которого относилась к пятому классу шероховатости $(R_a = 3,2$ мкм). Контролировалась аттестованная поверхность одного объекта.

Основа исследуемого зонда — двухлучевой интерферометр. В отличие от традиционного варианта интерферометра Майкельсона, в одной из ветвей (объектная ветвь) был установлен корпус высокочастотного разъема. В качестве источника излучения использовался источник белого света, чувствительность которого 0,03 мкм, а длина когерентности $l_c = 1$ мкм. В конструкции зонда предусмотрена возможность замены в опорной ветви опорного зеркала на голографическую дифракционную решетку.

Как известно из научной литературы, когерентноограниченные или низкокогерентные приборы, устройства, радары измерения рельефа поверхности основаны на анализе отраженной от рельефа составляющей светового излучения. Суть этих технических средств в том, чтобы получить контрастную картину в пределах длины когерентности при равенстве оптических длин в ветвях интерферометра.

Рассмотрим оптический измерительный блок зонда, который содержит интерферометр Майкельсона. Функциональная схема блока показана на рис. 1, где S — источник белого света, *D* — приемник излучения, *l* — светоделитель, 2 — исследуемая поверхность, 3 — зеркало в опорной ветви.



Puc. 1

При достожении равенства оптических длин в ветвях *ОМ* и *ON* фоторегистрирующее устройство фиксирует этот факт и передает сигнал на аналогово-цифровое устройство. Далее цифровой сигнал поступает в компьютер, и на мониторе появляется возможность наблюдать контрастную интерференционную картину. Как только рельеф поверхности начинает меняться на величину Δz , то контраст интерференционной картины начинает снижаться, так как $2\Delta z > l_c$. Если компенсировать опорное зеркало 3 на величину $\Delta z' = \Delta z$, то контраст восстановится. Поэтому любое изменение рельефа поверхности при перемещении относительно зонда можно компенсировать движением опорного зеркала. На рис. 2 показана функциональная схема разработанного зонда, где 1, 15 — суперлюминесцентные диоды; 2 — микрообъектив; 3, 8 — светоделители; 4 — объект; 5, 7, 9, 10, 11 — зеркала; 6, 14, 16 — фотоприемники (ФП); 12 — модулятор; 13 — дифракционные решетки; 17 — датчик скорости; 18 — блок электронной обработки сигналов.

В представленной разработке начало отсчета определяется с помощью второго интерферометра Майкельсона, образованного светоделителем 8, зеркалом 10 и общим для двух интер-





ферометров сканирующим зеркалом 9. Начало отсчета соответствует максимуму сигнала ФП 14, наблюдаемого в момент равенства длин плеч O_2L и O_2M . Этот сигнал является опорным: относительно него отсчитывается временное положение максимума информационного сигнала ФП 6. Зонд позволяет измерять относительное расстояние до объекта. Искомая информация содержится во временном интервале между максимумами сигналов ФП 6 и 14. Этот интервал определяется путем подсчета импульсов ФП 16 при сканировании дифракционных решеток 13.

Компенсационное изменение разности хода в ветвях интерферометра лежит в основе сканирующего режима измерений.

Результаты эксперимента. Суть сканирующего режима измерений, предназначенного для контроля поверхности объекта, отображена на рис. 3, где M — оптико-измерительный блок, P — исследуемая поверхность, S — световой луч, X'X'' — направление перемещения.

В процессе измерений оптико-измерительный блок M находился на расстоянии L_p от выходного зрачка блока до поверхности; L_p — среднее расстояние и определяется параметрами оптической системы, а также вариацией высоты рельефа δ_m . При измерениях исследуемый объект приводится в движение относительно измерительного блока. При перемещении объекта в блоке модулировалась разность хода посредством движения опорного зеркала и выявлялись моменты нулевой разности хода. В результате

$$\Delta z = f(x_i, y_i),$$

где $\Delta z = \Delta z'; \Delta z'$ — изменение рельефа в *i*-й точке; x_i, y_i — координаты проекции светового луча для *i*-й точки.

Данные о шероховатости поверхности были получены после обработки сигналов, поступающих с фотоприемных устройств 6, 14, 16. Алгоритм электронной обработки сигналов представлен на рис. 4. Сигналы с ФП 6, 14 проходят через идентичные каналы, в которых производится их предварительное и резонансное усиление на доплеровской частоте. Далее сигналы детектируются и после фильтрации нижних частот формируют огибающие объектной U и опорной U_0 волн. После математической обработки сигналы U_d и U_{0d} поступают на компараторы и с компараторов снимаются импульсы U_k и U_{0k} , где задний фронт соответствует максимальному значению U и U_0 . По сигналам U_k и U_{0k} триггерный блок создает меандр U_Δ , определяющий временной интервал между объектным и опорным сигналами. Далее U_Δ и U_N (с ФП 6) подаются на схему совпадения и снимаются импульсы U_{NZ} , соответствующие искомой величине.



При контроле рельефа поверхности объекта было зафиксировано наблюдаемое изображение (рис. 5, *a*). Интерференционная картина представлена спекл-структурой (картиной нерегулярных волновых фронтов при падении когерентного излучения на негладкую поверхность).



Появление спеклов ведет к случайным изменениям фазы, а значит, расчет фазовых характеристик проводить было нецелесообразно. Спеклструктура локализована вдоль направления *A-A'*. Именно эта область шероховатой поверхности появилась на мониторе за счет равенства длин в объектной и опорной ветвях интерферометра в пределах длины когерентности.

Также была получена кривая интенсивности интерференционной картины при изменении рельефа поверхности вдоль оси *OZ* (рис. 5, δ): как видно, интенсивность достигает максимума при $\Delta z' = \Delta z$.

В ходе исследования рассмотрены амплитуда и огибающая интерференционного сигнала, так как они являются значимыми параметрами зонда. Эти параметры отвечают за помехозащищенность измерений, величину полезного сигнала, изменение амплитуды и огибающей сигнала. Контроль проводился при следующих технических параметрах разработанного зонда:

— погрешность измерений:

$$\sigma_z = (0,03...0,1) l_c$$
 — для $\sigma = 0...15^\circ$;
 $\sigma_z = (0,3...0,8) l_c$ — для $\sigma = 30...45^\circ$ (σ — СКО);



- диапазон измерений рельефа поверхности 0...2 мм;
- частота измерений 46 т/с;
- диаметр пятна на поверхности 20 мкм;
- среднее расстояние от оптической головки до объекта 100 мм.

Поверхность корпуса высокочастотного разъема фиксировалась на рабочей плоскости микрометрического столика ST-111. В ходе эксперимента диаметр светового пятна (d) изменялся посредством стеклянных пластинок толщиной 2, 3, 4 мм, что соответствовало d, равному 30, 50, 70 мкм. Результаты эксперимента по исследованию амплитуды интерференционного сигнала при движении светового луча по поверхности (рис. 6, a) демонстрируют наличие деформации огибающих. Это связано со сложением некоррелированных составляющих спекл-структур, амплитуды которых различаются, что ведет к дополнительным изменениям амплитуды выходного сигнала. Среднее значение амплитуды от расфокусировки (увеличение диаметра светового пятна на поверхности) представлено графиком на рис. 6, d.

Заключение. Исследована поверхность корпуса высокочастотного разъема и зарегистрировано изображение контраста интерференционной картины, которое представлено спекл-структурой поля. Получена форма кривой интенсивности интерференционного сигнала при изменении рельефа поверхности и определен максимум интенсивности при $\Delta z' = \Delta z$. Измерены амплитуда и огибающая интерференционного сигнала. Показано, что при увеличении диаметра светового пятна растет амплитуда и деформируется огибающая и, как следствие, снижается точность измерений. Приведенные результаты значимы для производителей данного типа интерферометрических устройств контроля объектов сложной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
- 2. *Франсон М., Сланский С.* Когерентность в оптике / Пер. с франц.; под ред. К. С. Шифрина. М.: Наука, 1967. 80 с.
- 3. Котов И. Р., Ситник Д. Н., Хопов В. В. Гетеродинная голографическая и спекл-интерферометрия // Прикладная физическая оптика: Сб. науч. трудов. М.: МЭИ, 1987. № 134. С.113–115.
- 4. *Островский Ю. И., Танин Л. В.* Перестраиваемый лазер на органическом красителе для резонансной интерферометрии и голографии // Журнал технической физики. 1975. Т. 45, № 8. С. 1756–1766.
- 5. Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с франц.; под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
- 6. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
- 7. Клименко Н. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
- 8. Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный науч.-исслед. журнал. 2021. № 6 (108). С. 184–189.
- 9. Хохлова М. В., Арефьев А. В., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Громов О. В. Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного оптического щупа триггерного типа // Приборы. 2021. № 5. С. 8–16.
- Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179–189.
- 11. Бородянский Ю. М., Майоров Е. Е., Петрова Е. А., Попова Е. В., Курлов В. В., Удахина С. В. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5 (263). С. 3–7.
- 12. Майоров Е. Е., Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 9. С. 1–6.
- 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.

- Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е. Экспериментальное исследование фазоизмерительной установки обработки спеклограмм // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 109-112. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112.
- 15. *Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А.* Реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 2. С. 75–83.
- 16. Майоров Е. Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. Четвертая Всерос. науч. конф. Санкт-Петербург, 18–22 апр. 2023 г. СПб: ГУАП, 2023. С. 65–68.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Евгеньевич Майоров	 канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный универ- ситет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной матема- тики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
Александр Владимирович Арефьев	 канд. физмат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики, E-mail: aaref@yandex.ru
Рамиз Балахан оглы Гулиев	 канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный универ- ситет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной матема- тики; E-mail: ramiz63@yandex.ru
Вера Павловна Пушкина	канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный универ- ситет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: vera150465@yandex.ru
Александр Владимирович Дагаев	канд. техн. наук, доцент; Ивангородский гуманитарно-технический ин- ститут (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий, E-mail: adagaev@list.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

- 1. Born M., Wolf E. Principles of Optics, Pergamon Press, 1959.
- 2. Francon M., Slansky S. Coherence en optique, 1965.
- Kotov I.R., Sitnik D.N., Khopov V.V. Prikladnaya fizicheskaya optika (Applied Physical Optics: Collection of Scientific Papers), Moscow, 1987, no. 134, pp. 113–115. (in Russ.)
- 4. Ostrovsky Yu.I., Tanin L.V. Technical Physics, 1975, no. 8(45), pp. 1756–1766. (in Russ.)
- 5. Francon M. La granularite laser (spekle) et ses applications en optique, Paris etc., 1978.
- 6. Kolomiytsev Yu.V. Interferometry (Interferometers), Leningrad, 1976, 296 p. (in Russ.)
- 7. Klimenko N.S. *Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya* (Holography of Focused Images and Speckle Interferometry), Moscow, 1985, 224 p. (in Russ.)
- Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Arefyev A.V., Guliev R.B., Mayorov E.E., Gromov O.V. *Meždunarodnyj* naučnoissledovatel'skij žurnal (International Research Journal), 2021, no. 6(108), pp. 184–189, DOI: https://doi. org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029. (in Russ.)
- 9. Khokhlova M.V., Arefyev A.V., Mayorov E.E., Guliev R.B., Dagaev A.V., Gromov O.V. *Pribory*, 2021, no. 5, pp. 8–16 (in Russ.)
- 10. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University*. Technical Sciences, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
- 11. Borodyansky Yu.M., Mayorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. *Pribory*, 2022, no. 5(263), pp. 3–7 (in Russ.)
- 12. Mayorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics, 2021, no. 9, pp. 1–6. (in Russ.)
- 13. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Kostin G.A. Pribory, 2023, no. 5(275), pp. 51–54. (in Russ.)
- 14. Kostin G.A., Chernyak T.A., Mayorov E.E. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2023, no. 4, pp. 109–112, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112. (in Russ.)
- 15. Mayorov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation) 2023, no. 2(33), pp. 75–83. (in Russ.)
- Maiorov E.E. Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 65–68. (in Russ.)

		DATA ON AUTHORS		
Evgeny E. Maiorov	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru		
Alexander V. Arefiev	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: aaref@yandex.ru		
Ramiz B. Guliyev	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: ramiz63@yandex.ru		
Vera P. Pushkina	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: vera150465@yandex.ru		
Alexander V. Dagaev	—	PhD, Associate Professor; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute — Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mathematics, Informatics and information Customs Technologies; E-mail: adagaev@list.ru		
Described 44.40.0000 company distribution 40.04.0004 constraints 46 complete literation 00.07.0004				

Received 14.12.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 23.07.2024.