

УДК 681.787

© Е. Е. Майоров, Г. А. Костин, Н. Е. Баранов, 2025

ВЛИЯНИЕ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

В работе рассмотрены вопросы влияния спекл-полей на формирование амплитуды интерференционного сигнала при контроле деформированной поверхности интерференционной установкой, работающей в низкокогерентном свете. Интерференционные приборы, работающие в низкокогерентном свете, используют источники излучения белого света, суперлюминесцентные диоды, у которых длина когерентности находится в диапазоне от 100 мкм до 1 мкм. Длина когерентности источника излучения является ключевым параметром этих приборов, т.к. чем меньше длина когерентности, тем выше точность измерения микрорельефа поверхности, поэтому данная работа актуальна и перспективна. В статье поставлены цель и задачи исследования, рассмотрены свойства спекл-полей, а также предложен интерференционный метод контроля с применением частичнокогерентного излучения. В процессе эксперимента были проанализированы амплитуда выходного сигнала и выражения для амплитуды интерференционного сигнала, которые позволяют оценить функционирование и изменение параметров, вносимые в оптическую схему измерительной установки.

Ключевые слова: экспериментальная интерференционная установка, амплитуда сигнала, длина волны излучения, погрешность измерений, суперлюминесцентное излучение, микрорельеф поверхности, длина когерентности

EDN: VCVKCS

ВВЕДЕНИЕ

В современном метрологическом обеспечении измерения формы поверхности являются одной из важнейших задач [1, 2]. Для исследования поверхности существуют механические и оптические методы и технические средства, которые способны контролировать рельеф поверхности с точностью до десятых долей микрометра [3]. Исследователи отмечают, что на практике при измерениях механическими приборами и комплексами шероховатости поверхности не всегда можно добиться высокой производительности. У данных технических средств в течение короткого времени изнашивается контактный элемент, а также увеличивается погрешность измерений при контроле рельефа поверхности с малой устойчивостью [4]. В настоящей работе речь пойдет о современном оптическом методе измерения неровных поверхностей и влиянии спекл-полей на результаты измерений.

Касаемо оптических методов и средств контроля рельефа поверхности, то они могут быть представлены приборами и комплексами, где оптические системы построены на разных оптико-физических явлениях. Например, на анализе расходимости излучения, отраженного от поверхности, на исследовании фокусировки отраженного излучения, на изменении показателя преломления

среды между экспозициями, с компенсацией поперечного сдвига изображений, с применением несущей частоты спекл-полей пространственно когерентного излучения, а также при исследовании излучения с ограниченной временной когерентностью и т.д. [5–7].

В научно-технической литературе многие авторы отмечают тот факт, что цифровые автоматизированные интерференционные приборы и комплексы, работающие в низкокогерентном свете, для изучения поверхности сложной формы перспективны и актуальны. Их преимущества над оптическими приборами и комплексами геометрической оптики заключаются в следующем: чувствительность, диапазон измерений, расстояние до измеряемой поверхности не зависят от апертурных углов наблюдения и освещения [8]. Интерферометры, построенные по классическим схемам, не пригодны для измерения негладких поверхностей, т.к. используют высококогерентные источники света (лазеры), где длина когерентности источников варьируется от 10 мм до 50 мм. А это означает, что при анализе светового излучения, отраженного от исследуемой поверхности сложной формы, данные о рельефе возможно получить только в пределах длины когерентности, поэтому, кроме шума, никакой информации извлечь не получится [9].

В современных автоматизированных интерференционных приборах, работающих в низкокогерентном свете (АИПНК), используют источники белого света — суперлюминесцентные диоды, у которых длина когерентности находится в диапазоне от 100 до 1 мкм. Длина когерентности источника излучения является ключевым параметром этих приборов, т.к. чем меньше длина когерентности, тем выше точность измерения микрорельефа поверхности [10–14].

АИПНК достигли больших успехов в практическом применении за счет компактности, простоты эксплуатации и динамики измерений [9, 15–20]. Появилась информация анализа метрологии негладких поверхностей в разных режимах измерений (триггерный, сканирующий). Решены вопросы построения и эксплуатационных характеристик АИПНК. Разработчики постоянно совершенствуют функциональные возможности и повышают информационное содержание измерений этих приборов.

Поэтому представляет интерес влияние спекл-полей на амплитуду выходного сигнала при функционировании низкокогерентной интерференционной установки.

Целью работы явилось получение выражения для оценки амплитуды выходного сигнала при изменении параметров оптической схемы экспериментальной установки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотреть основные свойства спекл-полей, которые являются ключевыми при контроле деформированной поверхности низкокогерентной интерференционной установкой. Методом контроля негладкой поверхности с использованием низкокогерентного излучения выявить влияние спекл-полей на результаты измерений. Получить аналитическое выражение для амплитуды выходного сигнала при функционировании установки.

СВОЙСТВА СПЕКЛ-ПОЛЕЙ

Спекл-поля возможно наблюдать при освещении шероховатой поверхности как лазерным, так и частично когерентным излучением в пределах длины когерентности при отражении светового потока. На рис. 1 показана схема формирования спекл-полей при контроле деформированной поверхности. На экране N образуются темные и светлые области — это результат сложения элементарных световых волн.

Известно, что распределение интенсивности светового потока может быть описано выражением:

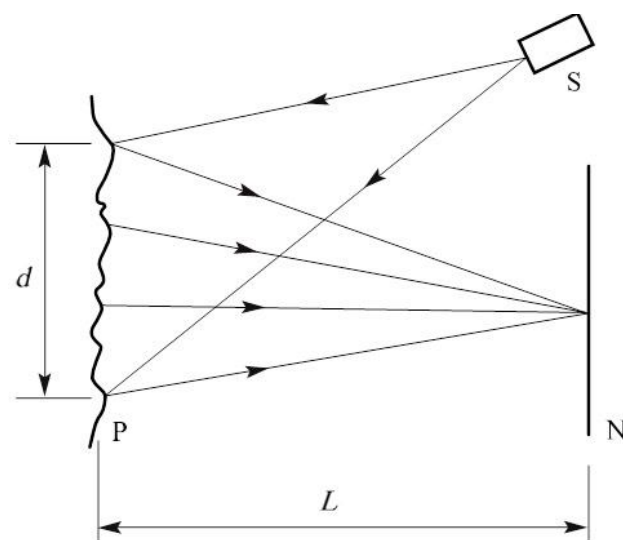


Рис. 1. Схема формирования спекл-полей при контроле деформированной поверхности.

S — суперлюминесцентный светодиод; P — деформированная поверхность; N — плоскость наблюдения

$$p(I) = (1/I_{\text{cp}}) \exp(-I/I_{\text{cp}}),$$

где $p(I)$ — плотность вероятности, I — интенсивность светового потока, I_{cp} — средняя интенсивность.

При взаимодействии светового излучения с контролируемой поверхностью суперлюминесцентного или белого источника света спеклы можно называть суперлюминесцентными или белого света. Из приведенного рисунка видно, что сформирована объектная картина спеклов, которая создана на определенном расстоянии от деформированной поверхности. Функция автокорреляции при объектной картине может быть представлена следующим выражением:

$$R_I(x, y) = I_{\text{cp}}^2 \left[I + \text{sinc}^2(d x / \lambda L) \cdot \text{sinc}^2(d y / \lambda L) \right],$$

где $R_I(x, y)$ — функция автокорреляции в плоскости xy , λ — длина волны излучения, L — расстояние от поверхности до плоскости наблюдения.

Значение этой функции — это расстояние между точками с максимальными и минимальными интенсивностями. Это расстояние принято принимать за характерный размер элемента спекл-поля, который равен:

$$B_S = 1.22 \lambda L / d,$$

где B_S — характерный размер, d — диаметр пятна на поверхности.

ВЛИЯНИЕ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД
КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе рассматривается интерференционное устройство, основанное на явлении двухлучевой интерференции, где в качестве источника излучения был суперлюминесцентный светодиод с длиной волны $\lambda = 387$ нм, длиной когерентности $l_c = 6.8$ мкм, мощностью излучения 1 мВт. Схема реализации экспериментальной измерительной установки показана на рис. 2.

В данном исполнении световой луч от источника света S фокусируется на зеркальную поверхность R пластинки в опорном канале и на исследуемую поверхность P объекта в объектном канале измерительной установки. Начальное состояние определяется равенством расстояний QN и QM. При таком условии интерференционное поле имеет максимум контраста.

При измерении микрорельефа поверхности зондируемая точка поверхности смещается относительно плоскости, где $z = 0$, на величину Δz . Это смещение обусловлено движением поверхности в продольных либо поперечных направлениях относительно светового пятна на поверхности. Начальное положение точки можно вернуть перемещением зеркальной поверхности R пластинки в опорном канале на величину $\Delta z' = \Delta z$.

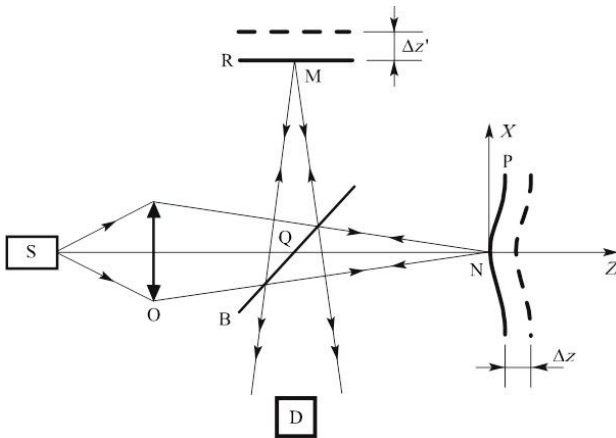


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки.

S — суперлюминесцентный светодиод; O — микрообъектив; B — светоделитель; R — зеркальная поверхность; P — поверхность объекта; D — фотоприемный блок

В фотоприемном блоке D, будет наблюдаться суперпозиция световых волн, пришедших из объектного и опорного каналов. Если принять движение зеркальной поверхности в опорном канале с постоянной линейной скоростью v , то это приведет к модуляции во времени разности фаз φ световых волн. Тогда получим:

$$\varphi = 2vt \cdot 2\pi / \lambda,$$

где λ — длина световой волны, $2vt = 2\Delta z'$ — изменение расстояния при движении зеркальной поверхности на $\Delta z'$.

Изменение интенсивности определяется выражением:

$$I(t) = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} vt\right),$$

где I_p — интенсивность в объектном канале, I_r — интенсивность в опорном канале, $\gamma_{pr}(t)$ — степень когерентности.

На рис. 3 приведен выходной сигнал, и видно, что максимум значения находится в точке t_m при $\Delta z' = \Delta z$, t_0 — точка начала отсчета. Смещения зеркальной поверхности в опорном канале характеризуются величиной $\Delta z_i = f(x, y)$, чем определяются интервалы $[t_0, t_m]$. Индекс i определяет точку в плоскости x, y .

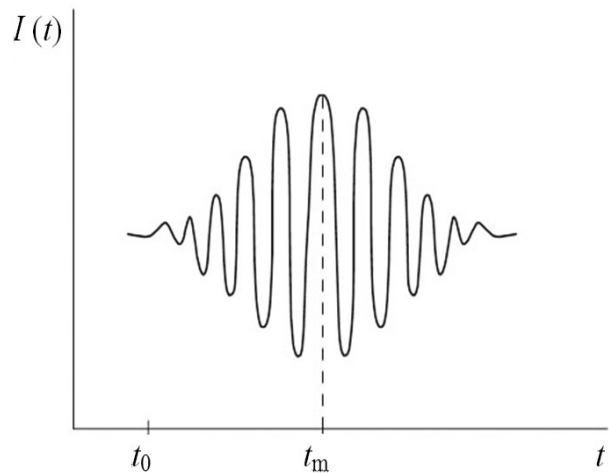


Рис. 3. Интерференционный сигнал.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе эксперимента была проанализирована амплитуда выходного сигнала, т.к. она является значимым параметром для эксплуатации разработанной низкокогерентной интерференционной установки.

Этот сигнал можно представить следующим выражением:

$$u(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2vt\right) d\omega,$$

где $u(t)$ — выходной сигнал, Ω — апертура фотоприемника, k — коэффициент преобразования излучения в электрический сигнал, $d\omega$ — элемент апертуры.

При анализе апертуры целесообразно исследовать огибающую сигнала. Тогда $\cos(2\pi/\lambda \cdot 2vt) = 1$, огибающая $U(t)$ будет равна:

$$U(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| d\omega.$$

Интерференционное поле будет представлять спекл-поле с удвоенным характерным размером элемента спекл-поля:

$$B_s = 2.44 \lambda L/d.$$

В случае ограниченной области освещения $I_p(x, y)$ получим набор отдельных спеклов. Поэтому для расчета усредненной величины огибающей выходного сигнала операцию интегрирования заменим суммированием средних интенсивностей отдельных спеклов.

Рассмотрим объектный канал измерительной установки, представленный на рис. 4. Размер пятна на поверхности для суперлюминесцентного излучения можно представить в виде:

$$I'_p(x, y) = I_s(x', y') \otimes \left[f(x, y) + \frac{\lambda_{cp}}{2\pi l_c} g(x, y) \right],$$

где $I'_p(x, y)$ — интенсивность на поверхности объекта, $I_s(x', y')$ — интенсивность в плоскости источника излучения, λ_{cp} — средняя длина волны, l_c — длина когерентности, $\otimes$ — операция свертки, $f(x, y)$ — функция для монохроматического излучения, $g(x, y)$ — функция для частично когерентного света.

Функция $f(x, y)$ дает информацию о каждой точке в плоскости изображения, которая увеличивается в диаметре на величину:

$$\Delta = 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o},$$

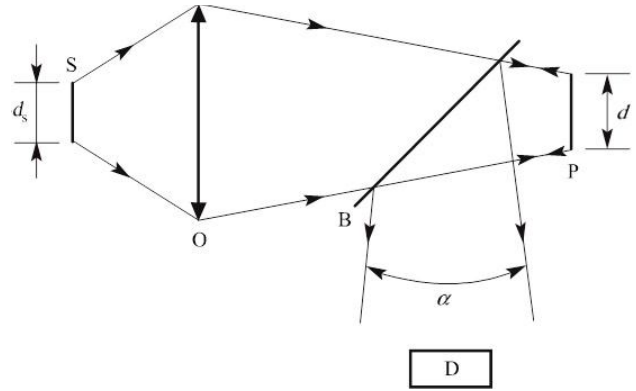


Рис. 4. Объектный канал измерительной системы.

S — суперлюминесцентный светодиод; O — микрообъектив; B — светоделитель; P — поверхность объекта; D — фотоприемный блок

где L_o — расстояние от объектива до поверхности объекта, D_o — диаметр объектива.

Функция $g(x, y)$ дает информацию для практически интересного случая $l_c > 4\lambda$, когда величина $(\lambda/2\pi \cdot l_c) g(x, y)$ составляет 2% от максимального значения $f(x, y)$. Поэтому выражение для диаметра d пятна на поверхности P можно записать:

$$d = \beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o},$$

где d_s — размер выходного зрачка источника света, β — масштаб изображения.

Тогда для характерного размера элемента спекл-поля:

$$B_s = 2.44 \frac{\lambda L}{\beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o}}. \quad (1)$$

Общее количество спеклов N_s в апертуре α фотоприемного блока равно:

$$N_s = \frac{L^2 \alpha^2}{B_s^2}. \quad (2)$$

Если амплитуды колебаний спеклов равны, тогда фазы равномерно распределены в промежутке от $-\pi$ до π , и общая амплитуда выходного сигнала U равна:

$$U = \sqrt{\frac{N}{2}} u(t). \quad (3)$$

Если (1) и (2) подставить в (3), то получим следующее выражение для усредненной по ансамблю реализаций огибающей выходного сигнала $\langle U(t) \rangle$:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0.61}{\sqrt{2}} \frac{k\pi L^2 \alpha \lambda \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_0}{D_0}} |\gamma_{pr}(t)|. \quad (4)$$

Перепишем выражение (4) с учетом (1) и (2) в следующем виде:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0.61 k\pi L^2 \alpha^2 \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\sqrt{2 N_s}} |\gamma_{pr}(t)|.$$

Полученное выражение позволяет оценить амплитуду выходного сигнала в зависимости от количества отдельных спеклов в апертуре фотоприемника. Формула (4) дает возможность оценивать амплитуду выходного сигнала при функционировании и изменении параметров оптической схемы измерительной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С первых шагов и по настоящее время в интерферометрии, где используются высококогерентные источники света (лазеры) в научных и технических исследованиях достигнуты большие успехи в измерении зеркальных, высокополированных и оптических поверхностей линзовой оптики. В настоящей работе получены экспериментальные данные о параметре, который напрямую влияет на точность измерений низкокогерентной интерференционной установки при контроле шероховатой поверхности. Получены выражения для амплитуды интерференционного сигнала, которые позволяют оценить функционирование и изменение параметров, вносимое в оптическую схему измерительной установки.

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.: Наука, 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 // Сб. докладов Четвертой Всероссийской научной конференции "Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем". 2023. С. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53830560&pff=1>
11. Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Арефьев А.В., Бородинский 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. 230–234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366>
12. Майоров Е.Е. К вопросу о погрешности измерений в сдвиговой интерферометрии // Сб. докладов Четвертой Всероссийской научной конференции "Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем". 2023. С. 61–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53830561>
13. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Бородинский 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://www.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. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695
16. Бородинский 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48969218>
17. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Курлов В.В., Баранов Н.Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726

18. 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
19. Майоров Е.Е., Курлов В.В., Арефьев А.В., Пушкина В.П. Оптимизация фотоприемной части интерференционной установки способом параллельной обработки оптических сигналов // ПРИБОРЫ. 2024. № 9. С. 32–35.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75155955>
20. Майоров Е.Е., Жулега И.А., Новиков А.В. Инновационное решение в исследовании поверхности сложной геометрической формы сканирующим интерференционным щупом // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 45–50.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74497008>

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., Баранов Н.Е.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 09.12.2024

THE EFFECT OF SPECKLE FIELDS ON MEASUREMENT RESULTS WHEN MONITORING A DEFORMED SURFACE WITH A LOW-COHERENCE INTERFERENCE INSTALLATION

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

¹*Saint Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP), Saint Petersburg*

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

The paper considers the influence of speckle fields on the formation of the amplitude of the interference signal when monitoring a deformed surface using a low-coherence light interference installation. Interference devices operating in low-coherence light use white light sources, superluminescent diodes, which coherence length ranges from 100 microns to 1 micron. The coherence length of the radiation source is a key parameter of these devices, since the shorter the coherence length, the higher the accuracy of measuring the microrelief of the surface; therefore, this work is relevant and promising. The article sets the purpose and objectives of the study, considers the properties of speckle fields, and proposes an interference control method using partially coherent radiation. During the experiment, the amplitude of the output signal and expressions for the amplitude of the interference signal were analyzed, which made it possible to evaluate the functioning and change of parameters introduced into the optical circuit of the measuring installation.

Keywords: experimental interference setup, signal amplitude, radiation wavelength, measurement error, superluminescent radiation, surface microrelief, coherence length

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of optics*. 4th edit. Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt, Pergamon Press, 1968. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
2. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
3. Francon M., Slansky S. *Coherence en optique*. Paris, 1965. (Russ. ed.: Franson M., Slanskii S. *Kogerentnost' v optike*. Transl. from French K.S. Shifrin. Moscow, Nauka Publ., 1967. 80 p.).
4. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p.
5. Malacara D. *Optical shop testing*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, John Wiley and Sons. (Russ. ed.: Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'*. Translate A.N. Sosnova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p.).
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* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences], 2022, no. 8, pp. 75–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49521599> (In Russ.).
10. Maiorov E.E. [Investigation of the output interference signal in the phase measuring system]. *Sb. dokladov IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. IV All-Russ. sci. conf. "Modeling and situational quality management of complex systems"]. 2023, pp. 56–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53830560&pf=1> (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* [Izvestiya Tula State University. Technical Sciences], 2022, no. 12, pp. 230–234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50128366> (In Russ.).
12. Maiorov E.E. [On the issue of measurement error in shear interferometry]. *Sb. dokladov IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"* [Proc. IV All-Russ. sci. conf. "Modeling and situational quality management of complex systems"]. 2023, pp. 61–64. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53830561>
13. Maiorov E.E., Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliyev R.B., 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 zavedeni.*

- 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. Maierov E.E., Chernyak T.A., Kostin G.A. [Application of highly sensitive photomaterials on the basis of silver halides for investigation of the influence of speckle substrate deviations on the measurement results]. *Pribory* [Instruments], 2023, no. 5 (275), pp. 51–54. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54266626>
 15. Maierov E.E., Borodyansky Yu.M., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S., Pushkina V.P., Guliyev R.B. [Spatial micro-scanning 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. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695
 16. Borodyansky Yu.M., Maierov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. [Measurement of geometrical parameters of surfaces of complex shape by low-coherent optical system]. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 5 (263), pp. 3–7. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48969218>
 17. Maierov E.E., Kostin G.A., Kurlov V.V., Baranov N.E. [Study of the dynamic surface of an aircraft by the interference method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2024, vol. 67, no. 8, pp. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726 (In Russ.).
 18. Maierov 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]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2024, vol. 67, no. 9, pp. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797 (In Russ.).
 19. Maierov E.E., Kurlov V.V., Arefiev A.V., Pushkina V.P. [Visual disability in the Russian Federation. Report at the XV Russian National Ophthalmologic Forum]. *Pribory* [Instruments], 2024, no. 9, pp. 32–35. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75155955>
 20. Maierov E.E., Zhulega I.A., Novikov A.V. [An innovative solution in the study of a complex geometric surface with a scanning interference probe]. *Innovatsionnoe priborostroenie* [Innovative instrumentation], 2024, vol. 3, no. 5, pp. 45–50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74497008>

Contacts: *Maierov Evgeniy Evgen'evich*,
maierov_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 09.12.2024

INTRODUCTION

In modern metrology, surface shape measurements are one of the most important tasks [1, 2]. For surface research, there are mechanical and optical methods and technical means that are capable of monitoring surface relief with an accuracy of up to tenths of a micrometer [3]. Researchers note that in practice, when measuring surface roughness with mechanical devices and complexes, it is not always possible to achieve high productivity. The contact element of these technical means wears out in a short time, and the measurement error increases when monitoring surface relief with low stability [4]. This paper will discuss a modern optical method for measuring uneven surfaces and the effect of speckle fields on measurement results.

As for optical methods and means for monitoring surface relief, they can be represented by devices and complexes where optical systems are based on different optical-physical phenomena. For example, the analysis of the divergence of radiation reflected from the surface, the study of the focusing of reflected radiation, the change in the refractive index of the medium between exposures, the compensation for the transverse shift of images, the carrier frequency of speckle fields of spatially coherent radiation, the radiation with limited time coherence, etc. [5–7].

In the scientific and technical literature, many authors note the fact that digital automated interference devices and complexes operating in low-coherence light are promising and relevant for studying rough surfaces. Their advantages over optical devices and geometric optics complexes are as follows: sensitivity, measurement range, and distance to the measured surface do not depend on the aperture angles of observation and illumination [8]. Interferometers built according to classical schemes are not suitable for measuring non-smooth surfaces since use highly coherent light sources (lasers) with a variation of the coherence length of the sources from 10 mm to 50 mm. This means that when analyzing light radiation reflected from the studied rough surface, data on the relief can only be obtained within the coherence length, therefore, no information but noise can be extracted [9].

Modern automated interference devices operating in low-coherence light (AILLD) use white light sources — superluminescent diodes with coherence length in the range from 100 μm to 1 μm . The coherence length of the radiation source is a key parameter of these devices, since the shorter the coherence length, the higher the accuracy of measuring the surface microrelief [10–14].

AILLDs have achieved great success in practical application due to their compactness, ease of operation, and measurement dynamics [9, 15–20]. Information has appeared on the analysis of the

metrology of rough surfaces in different measurement modes (trigger, scanning). The issues of design and operational characteristics of AILLD have been resolved. Developers are constantly improving the functionality and increasing the information content of measurements of these devices.

Therefore, the effect of speckle fields on the amplitude of the output signal during operation of a low-coherence interference setup is of interest.

The aim of the work was to obtain an expression for estimating the amplitude of the output signal when changing the parameters of the optical scheme of the experimental setup.

PROBLEM STATEMENT

Consider the main properties of speckle fields, which are key when testing a deformed surface with a low-coherence interference setup. Using the method of testing a rough surface by means of low-coherence radiation, identify the effect of speckle fields on the measurement results. Obtain an analytical expression for the amplitude of the output signal during operation of the setup.

PROPERTIES OF SPECKLE FIELDS

Speckle fields can be observed when illuminating a rough surface with both laser and partially coherent radiation within the coherence length when reflecting the light flux. Fig. 1 shows the scheme for the formation of speckle fields when testing a deformed surface. On the screen N dark and light areas are formed - this is the result of the addition of elementary light waves.

Fig. 1. Scheme of speckle field formation during deformed surface testing.
S — superluminescent LED; P — deformed surface;
N — observation plane

It is known that the distribution of the intensity of the luminous flux can be described by the expression:

$$p(I) = (1/I_{cp}) \exp(-I/I_{cp}),$$

where $p(I)$ is the probability density, I is the intensity of the luminous flux, I_{cp} is the average intensity.

When light radiation interacts with the studied surface of a superluminescent or white light source, speckles can be called superluminescent or white light. From the figure shown, it is clear that an object pattern of speckles is formed, and it is created at a certain distance from the deformed surface. The

autocorrelation function for the object pattern can be represented by the following expression:

$$R_I(x, y) = I_{cp}^2 \left[I + \text{sinc}^2(d x / \lambda L) \cdot \text{sinc}^2(d y / \lambda L) \right],$$

where $R_I(x, y)$ is the autocorrelation function in the xy plane, λ is the radiation wavelength, L is the distance from the surface to the observation plane.

The value of this function is the distance between the points with maximum and minimum intensities. This distance is usually taken as the characteristic size of the speckle field element, which is equal to:

$$B_S = 1.22 \cdot \lambda L / d,$$

where B_S is the characteristic size, d is the diameter of the spot on the surface.

INTERFERENCE METHOD OF CONTROL USING PARTIALLY COHERENT RADIATION

The paper considers an interference device based on the phenomenon of two-beam interference, where the radiation source was a superluminescent light-emitting diode with a wavelength of $\lambda = 387$ nm, a coherence length of $l_c = 6.8$ μ m, and a radiation power of 1 mW. The schematic diagram of the experimental measuring setup is shown in Fig. 2.

Fig. 2. Optical scheme of the experimental setup. S — superluminescent LED; O — microlens; B — beam splitter; R — mirror surface; P — object surface; D — photodetector unit

In this design, the light beam from the light source S is focused on the mirror surface R of the plate in the reference channel and on the studied surface P of the object in the object channel of the measuring setup. The initial state is determined by the equality of the distances QN and QM. Under this condition, the interference field has a maximum contrast.

When measuring the surface microrelief, the probed point of the surface shifts relative to the plane where $z = 0$ by the value Δz . This shift is caused by the surface movement in the longitudinal or transverse directions relative to the light spot on the surface. The initial position of the point can be returned by moving the mirror surface R of the plate in the reference channel by the value $\Delta z' = \Delta z$.

In the photodetector unit D, a superposition of light waves coming from the object and reference channels is observed. If we accept the movement of the mirror surface in the reference channel with a constant linear velocity v , this leads to a time modulation of the phase difference φ of the light waves. And we obtain:

$$\varphi = 2vt \cdot 2\pi / \lambda,$$

where λ is the wavelength of light, $2vt = 2\Delta z'$ is the change in distance when the mirror surface moves by $\Delta z'$.

The change in intensity is determined by the expression:

$$I(t) = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cdot |\gamma_{pr}(t)| \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} vt\right),$$

where I_p is the intensity in the object channel, I_r is the intensity in the reference channel, $\gamma_{pr}(t)$ is the degree of coherence.

Fig. 3 shows the output signal, and it is evident that the maximum value is at point t_m when $\Delta z' = \Delta z$, t_0 is the starting point. The displacements of the mirror surface in the reference channel are characterized by the value $\Delta z_i = f(x, y)$, which determines the intervals $[t_0, t_m]$. The index i defines the point in the x, y plane.

Fig. 3. Interference signal

EXPERIMENTAL RESULTS

During the experiment, the amplitude of the output signal was analyzed, since it is a significant parameter for the operation of the developed low-coherence interference setup.

This signal can be represented by the following expression:

$$u(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2vt\right) d\omega,$$

where $u(t)$ is the output signal, Ω is the aperture of the photodetector, k is the coefficient of conversion of radiation into an electrical signal, $d\omega$ is the aperture element.

When analyzing the aperture, it is advisable to study the signal envelope. Then $\cos(2\pi/\lambda \cdot 2vt) = 1$, the envelope $U(t)$ is equal to:

$$U(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| d\omega.$$

The interference field is a speckle field with a doubled characteristic size of the speckle field element:

$$B_S = 2.44 \cdot \lambda L / d.$$

In the case of a limited illumination region $I_p(x, y)$, we obtain a set of individual speckles. Therefore, to calculate the average value of the output signal envelope, we replace the integration operation with the summation of the average intensities of individual speckles.

Let us consider the object channel of the measuring setup shown in Fig. 4. The spot size on the surface for superluminescent radiation can be represented as:

$$I'_p(x, y) = I_s(x', y') \otimes \left[f(x, y) + \frac{\lambda_{cp}}{2\pi l_c} g(x, y) \right],$$

where $I'_p(x, y)$ is the intensity on the object surface, $I_s(x', y')$ is the intensity in the plane of the radiation source, λ_{cp} is the average wavelength, l_c is the coherence length, $\otimes$ is the convolution operation, $f(x, y)$ is the function for monochromatic radiation, $g(x, y)$ is the function for partially coherent light.

Fig. 4. Object channel of the measuring system. S — superluminescent LED; O — micro-lens; B — beam splitter; P — object surface; D — photodetector unit

The function $f(x, y)$ provides information about each point in the image plane, which increases in diameter by the value:

$$\Delta = 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o},$$

where L_o is the distance from the lens to the surface of the object, D_o is the diameter of the lens.

The function $g(x, y)$ provides information for the interesting case $l_c > 4\lambda$, when the value of $(\lambda / 2\pi \cdot l_c)$ $g(x, y)$ is 2% of the maximum value of $f(x, y)$. Therefore, the expression for the diameter d of the spot on the surface P can be written:

$$d = \beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o},$$

where d_s is the size of the exit pupil of the light source, β is the image scale.

Then for the characteristic size of the speckle field element:

$$B_s = 2.44 \frac{\lambda L}{\beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o}}. \quad (1)$$

The total number of speckles N_s in the aperture $\square$ of the photodetector block is:

$$N_s = \frac{L^2 \alpha^2}{B_s^2}. \quad (2)$$

If the amplitudes of speckle oscillations are equal, then the phases are uniformly distributed in the interval from $-\pi$ to π , and the total amplitude of the output signal U is:

$$U = \sqrt{\frac{N}{2}} u(t). \quad (3)$$

If (1) and (2) are substituted into (3), then we obtain the following expression for the envelope of the output signal averaged over the ensemble of realizations $\langle U(t) \rangle$:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0.61 k\pi L^2 \alpha \lambda \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\sqrt{2} \beta d_s + 1.22 \frac{\lambda L_o}{D_o}} |\gamma_{pr}(t)|. \quad (4)$$

Let us rewrite expression (4) taking into account (1) and (2) as follows:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0.61 k\pi L^2 \alpha^2 \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\sqrt{2 N_s}} |\gamma_{pr}(t)|.$$

The obtained expression allows us to estimate the amplitude of the output signal depending on the number of individual speckles in the aperture of the photodetector. Formula (4) makes it possible to estimate the amplitude of the output signal during the operation and change of parameters of the optical circuit of the measuring setup.

CONCLUSION

From the first steps to the present time, in interferometry using highly coherent light sources (lasers), great success has been achieved in scientific and technical research in measuring mirror, highly polished and optical surfaces of lens optics. In this paper, experimental data are obtained on a parameter that directly affects the accuracy of measurements of a low-coherent interference setup when testing a rough surface. Expressions are obtained for the amplitude of the interference signal, which allow us to estimate the operation and change of parameters introduced into the optical circuit of the measuring setup.