

УДК 681.23: 681.787.7

DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-2-170-178

**СПОСОБ МИНИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ СПЕКЛ-МОДУЛЯЦИИ
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРА,
РАБОТАЮЩЕГО В ТРИГГЕРНОМ РЕЖИМЕ**

**METHOD TO MINIMIZE THE INFLUENCE OF SPECKLE-MODULATION
IN THE MEASUREMENT RESULTS OF INTERFEROMETER
OPERATING IN TRIGGER MODE**

**Е.Е. Майоров¹⁾, М.С. Туровская¹⁾, А.Н. Литвиненко²⁾,
Т.А. Черняк³⁾, А.В. Дагаев⁴⁾, Е.А. Писарева⁵⁾
Е.Е. Maiorov¹⁾, М.С. Turovskaya¹⁾, А.Н. Litvinenko²⁾,
Т.А. Chernyak³⁾, А.В. Dagaev⁴⁾, Е.А. Pisareva⁵⁾**

¹⁾Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕврАзЭС,
194044, Санкт-Петербург, ул. Смолячкова, д. 14, корп. 1,
e-mail: majorov_ee@mail.ru

²⁾Санкт-Петербургский университет МВД России,
198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилотова, д. 1.

³⁾Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП),
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

⁴⁾Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,
190103, Санкт-Петербург, Лермонтовский пр-т, д. 44, Лит. А

⁵⁾Михайловская военная артиллерийская академия,
195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 22.

¹⁾University of the Interparliamentary Assembly of the EurAsEC,
14, k 1 Smolyachkova st., Lit. B. Saint-Petersburg, 194044, Russia,
e-mail: majorov_ee@mail.ru

²⁾Saint-Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs,
1 Pilot Pilyutova st., Saint-Petersburg, 198206, Russia

³⁾Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67 Bolshaya Morskaya st., Lit. A., Saint-Petersburg, 190000, Russia

⁴⁾Saint-Petersburg university of management technologies and economics,
44 Lit. A. Lermontovsky Ave., Saint-Petersburg, 190103, Russia

⁵⁾Mikhailovskaya artillery military Academy,
22 Komsomol st, Saint-Petersburg, 195009, Russia

Аннотация

В работе представлен способ минимизации влияния спекл-модуляции на результаты измерений интерферометра, работающего в триггерном режиме. Способ заключается в увеличении числа независимых измерений за время одного прохода интерферометра с последующим их усреднением. Способ реализуется посредством введения дополнительной модуляции оптической разности хода. Анализ сканирования поверхности сложной формы показал, что наличие поперечной компоненты движения при модуляции оптической длины объектного плеча приводит к случайной модуляции интерференционного сигнала спекл-структурой отраженной объектной волны и к ошибке измерения. Получены соотношения между основными параметрами устройства, необходимые для достижения положительного эффекта, в частности, устранению ошибки измерения.

Abstract

The paper the method to minimize the influence of speckle-modulation in the measurement results of interferometer operating in trigger mode is presented. The method is to increase the number of independent measurements during a single pass interferometer with subsequent averaging. The method is implemented by introducing an additional modulation of the optical path difference. Analysis of surface scanning of complex shapes have shown that the presence of transverse components of motion for the modulation of the optical length of the object of the shoulder leads to a random modulation of the interference signal of the speckle structure of the reflected object wave and the measurement error. The relations between the main parameters of the device necessary to achieve a positive effect, in particular, to eliminate measurement errors are obtained.

Ключевые слова: интерферометр; спекл; триггерный режим; длина когерентности; микрообъектив; компаратор; опорное зеркало.

Keywords: interferometer; speckle; trigger mode; the coherence length; microobjective; a comparator; a reference mirror.

Введение

Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхности объектов всегда являлось важной задачей метрологии. В настоящее время для решения указанной задачи существует широкий класс методов и технических средств, которые подразделяются на контактные и бесконтактные.

Контактные методы реализуются в различных конструкциях механических щупов. В настоящее время ведущие фирмы-производители оптико-механических приборов, такие, как Carl Zeiss, Renishaw, производят контактные щупы, позволяющие измерять рельеф поверхности с точностью до 1,0-0,1 мкм [1-4].

Основными недостатками контактных методов являются низкая производительность, требование хорошей виброзащиты, относительно быстрый износ щупового элемента. Кроме того, использование контактных методов измерений может оказать негативное влияние на объекты с малой устойчивостью к механическому воздействию. Поэтому на использование контактных методов накладывается ограничение по классу контролируемых объектов. Также контактные методы не пригодны для решения динамических задач.

Указанные недостатки исключаются применением бесконтактных методов контроля. Важное место среди них занимают оптические методы [2, 5-7, 9].

Оптические методы измерений рельефа поверхности и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, отраженного от контролируемой поверхности. Анализ литературных данных показал, что наиболее перспективными в этом классе приборов являются интерферометры, в которых используются источники излучения с ограниченной длиной временной когерентности. Это направление в оптическом приборостроении относительно новое и интенсивно развивается лишь в последние годы. Приборы указанного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами геометрической оптики, а именно: точность, диапазон измерений, а также расстояние до контролируемой поверхности не зависят от апертурных углов освещения и наблюдения [5-7, 10-12].

Однако, несмотря на определенные успехи в практическом использовании этих приборов, теоретический анализ их функционирования явно недостаточен. Остаются нерешенными многие вопросы построения и эксплуатационных характеристик приборов, отсутствуют какие-либо данные анализа метрологии неплоских поверхностей, связанных с использованием интерферометров, работающих в триггерном режиме измерений.

При освещении диффузной поверхности лазерным излучением в отраженном свете наблюдается картина спеклов [8, 10-14]. Каждая точка освещенной поверхности рассеи-

вает некоторое количество света в направлении экрана. Вследствие высокой пространственной и временной когерентности лазерного излучения световые волны, рассеянные всеми точками поверхности, также когерентны.

В результате сложения элементарных волн на экране наблюдается интерференционная картина – хаотическое чередование светлых и темных пятен, называемых спеклами [8, 12-14]. Их сложение приводит, во-первых, к искажению формы результирующей огибающей и к неоднозначности определения максимума сигнала, во-вторых – к растягиванию огибающей во времени. Эти факторы обуславливают погрешность определения момента нулевой разности хода, соответствующей центру освещенного участка поверхности. Поэтому целью работы является предложить способ минимизации погрешности на результаты измерений.

Влияние спекл-модуляции на результаты измерений

При декорреляции спекл-полей формируется деформированная форма выходного интерференционного сигнала, а также увеличивается его длительность [10-14]. Эти факторы увеличивают погрешность измерений в несколько раз. При эксплуатации интерферометра в триггерном режиме появляются дополнительные причины случайной модуляции огибающей выходного сигнала. Интерференционное поле в плоскости регистрации является результатом суперпозиции регулярного фронта опорной волны и спекл-модулированной объектной. В триггерном режиме измерений неподвижно опорное зеркало, модуляция оптической разности хода происходит за счет движения прибора относительно объекта [12, 14]. Следовательно, при наличии поперечной компоненты смещения интерферометра относительно поверхности происходит изменение картины спекл-интерференционного поля. На представленной схеме (рис. 1) функционирования триггерного режима измерений изображен идеализированный вариант геометрии измерения: поверхность объекта – квазиплоская; траектория движения интерферометра лежит в плоскости, причем параллельно поверхности объекта; движение его, модулирующее оптическую разность хода, совпадает с направлением зондирующего луча, а сам луч – перпендикулярен поверхности объекта.

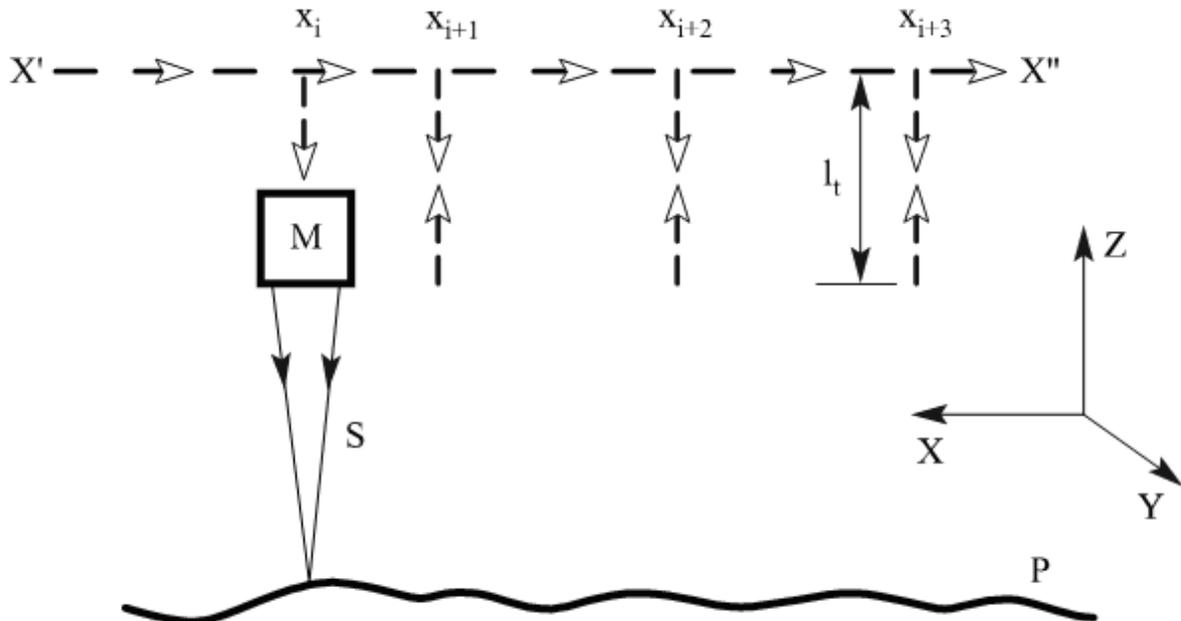


Рис. 1. Триггерный режим измерений рельефа поверхности с помощью интерферометра Майкельсона; М – интерферометр Майкельсона, Р – контролируемая поверхность

S – зондирующий пучок, $X'X''$ – траектория движения интерферометра

Fig. 1. Trigger mode measurement of surface topography using the Michelson interferometer;

M – the Michelson interferometer, R – controlled surface, S – the probe beam, $X'X''$ – path interferometer

На практике, в общем случае, контролируемая поверхность имеет сложную геометрическую форму. Поэтому наряду с чисто модуляционной компонентой – изменением оптической длины объектного плеча – присутствует и поперечная компонента движения, приводящая к перемещению зондирующего пятна по поверхности объекта. Существует хорошо известное правило при разработке способов противодействия влияния спекл-модуляции: спеклы «боятся» статистики. Поэтому для общего решения указанной проблемы предлагается следующее: увеличение числа независимых измерений с последующим их усреднением [8, 10-14].

Интерферометр, работающий в триггерном режиме измерений

Рассмотрим функционирование интерферометра в триггерном режиме. Данный прибор представляет собой интерферометр Майкельсона, в который вместо одного из зеркал помещен исследуемый объект. В качестве источника излучения используется суперлюминесцентный диод с длиной волны $\lambda = 0,83$ мкм, длиной когерентности $l_c = 30$ мкм, мощностью излучения 3 мВт. Микрообъектив ($10\times$, $f = 15,5$ мм, $A = 0,3$) фокусирует излучение источника на контролируемую поверхность объекта.

В этом режиме изменение контраста интерференционного поля обусловлено модуляцией разности хода вследствие перемещения интерферометра. В общем случае, при наличии поперечной компоненты движения зондирующего излучения по поверхности объекта, происходит изменение картины спеклов в плоскости регистрации. Скорость этого изменения определяется скоростью поперечного перемещения луча по поверхности. Если резко увеличить скорость съема информации таким образом, что спеклы в плоскости регистрации за время одного измерения окажутся «заморожены» [8, 10-14], будем считать задачу решенной. Поэтому сущность предлагаемого способа минимизации влияния спекл-модуляции заключается в следующем: за время относительно медленного приближения интерферометра к поверхности объекта при значительном увеличении скорости съема информации необходимо произвести несколько независимых измерений расстояния до поверхности и затем усреднить их.

Для реализации предлагаемого способа вводится дополнительная модуляция разности хода за счет сканирования опорного зеркала. Требования к параметрам сканирования, необходимым для достижения поставленной цели, можно представить в виде

$$\frac{l_{oz}}{V} \ll \frac{l_t}{V_t}, V \gg V_x, \quad (1)$$

где l_{oz} - амплитуда сканирования опорного зеркала, V - скорость сканирования опорного зеркала, l_t - расстояние, на которое смещается измерительная головка за один проход (для схемы на рис. 1 величина l_t совпадает с изменением длины объектного плеча интерферометра), V_t - скорость изменения оптической длины объектного плеча, V_x – скорость поперечного смещения зондирующего пятна по поверхности объекта.

При выполнении условий (1), во-первых, за один проход измерительной головки удастся произвести несколько независимых измерений; во-вторых, во время одного измерения спеклы в плоскости регистрации окажутся «заморожены».

Исходя из условий (1) необходимо сформулировать требования к техническим параметрам оптического щупа и решить вопрос о количественном соотношении между скоростями V_x и V , чтобы предлагаемый способ привел к положительному эффекту. Для решения поставленных вопросов были проведены экспериментальные исследования.

Цель эксперимента: при фиксированных частоте (2 кГц) и скорости сканирования опорного зеркала (400 мм/с) определить допустимую скорость поперечного смещения поверхности объекта. В качестве критерия оценки достижения положительного

эффекта измерялась величина среднеквадратического отклонения расстояния до поверхности объекта.

Схема проведения экспериментальных исследований приведена на рис. 2. Диффузно отражающий объект 1 установлен на параллелограммном механизме 2. Колебания механизма возбуждаются генератором 3. На схеме движение объекта происходит вдоль оси **X**. Измерение расстояния до объекта производится оптическим щупом 4. Для вычисления среднеквадратического отклонения бралось 20 независимых измерений. Важное условие проведения эксперимента – обеспечить идентичность положений объекта и его скорости для каждого из этих 100 измерений. С этой целью в экспериментальном макете использовался датчик скорости 5, образованный из электромагнитной катушки и постоянного магнита, закрепленного на параллелограммном механизме. Компаратор 6 позволяет выделять моменты времени, характеризуемые максимальной скоростью движения объекта $V_{x, max}$. Для этих моментов компаратор формирует разрешающий сигнал для выдачи информации интерферометром Майкельсона.

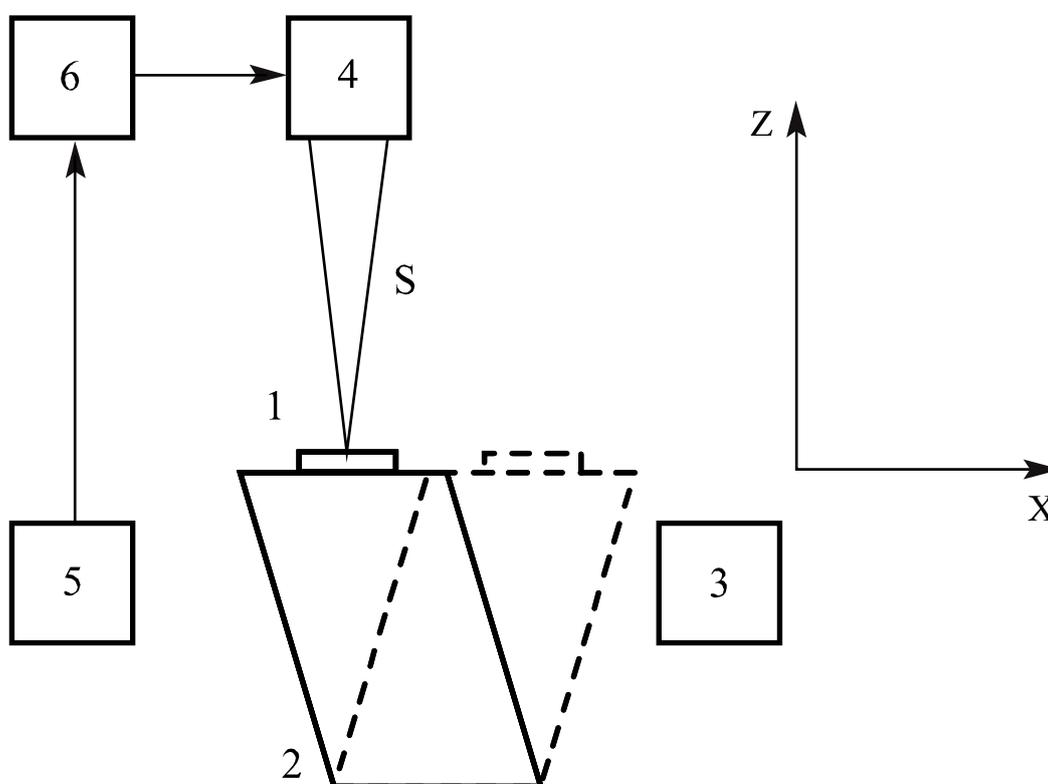


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1 – объект, 2 – параллелограммный механизм, 3 – возбуждающий генератор, 4 – интерферометр Майкельсона, 5 – датчик скорости, 6 – компаратор, S – зондирующий пучок

Fig. 2. The experimental setup, 1 – the object, 2 – parallelogram mechanism, 3 – exciting generator, 4 – the Michelson interferometer, 5 – speed sensor, 6 – comparator, S – the probe beam

Таким образом, измерение расстояния до объекта производится в моменты максимальной скорости его движения. Поскольку движение объекта происходит по гармоническому закону

$$x = x_m \sin 2\pi\nu t,$$

оценка максимальной скорости производилась по амплитуде колебаний параллелограммного механизма:

$$V_{x,\max} = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi x_m \nu,$$

где x_m – амплитуда механических колебаний; ν – частота колебаний.

В эксперименте изменение скорости движения объекта задавалось изменением амплитуды генератора. Измерения проводились при следующих параметрах представленных в таблице 1.

Таблица 1.
Table 1.

Технические параметры экспериментальной установки
Technical parameters of the experimental setup

скорость перемещения опорного зеркала	$V = 400$ мм/с
длительность выходного сигнала по уровню 0,1	$\tau_1 = 50$ мкс
размер зондирующего пятна	$d = 40$ мкм
частота колебаний параллелограммного механизма	$\nu = 23$ Гц

На рис. 3 представлены результаты исследований – зависимость среднеквадратического отклонения измерений расстояния до объекта σ_z от скорости движения объекта $V_{x,\max}$. Из графиков следует, что поперечное смещение поверхности относительно интерферометра практически не сказывается на точности измерений до скорости порядка 60 мм/с.

Поскольку при проведении эксперимента скорость перемещения опорного зеркала оставалась неизменной, можно сделать следующий вывод: 400 мм/с - это нижний предел скорости модуляции оптической разности хода при скорости поперечного смещения объекта, равной 60 мм/с.

На практике, однако, более полезной является зависимость $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_\tau)$ где величина ε_τ выражает отношение величины смещения зондирующего пятна за время одного измерения τ_1 к размеру пятна d :

$$\varepsilon_\tau = \frac{V_{x,\max} \tau_1}{d}.$$

Соответствующая зависимость показана на рис. 3. б.

Следующим, подлежащим выяснению вопросом, является вопрос о дискретности съема информации. Поскольку поставлена задача о серии независимых измерений с последующим их усреднением, необходимо выяснить, каков должен быть шаг измерений, чтобы их можно было считать независимыми.

С этой целью проводились измерения корреляционной функции:

$$R(\Delta x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} U(x, \Delta z) U(x + \Delta x, \Delta z) d\Delta z}{\int_{-\infty}^{\infty} U^2(x, \Delta z) d\Delta z},$$

где $R(\Delta x)$ – корреляционная функция, $U(x, \Delta z)$ – огибающая выходного сигнала, Δx – шаг измерений.

Зависимость огибающей выходного сигнала $U(x_i, \Delta z)$ и $U(x_i + \Delta x, \Delta z)$ для каждого значения Δx снимались в 50-ти произвольных точках поверхности объекта x_i . После чего вычислялось среднее значение $R(\Delta x)$.

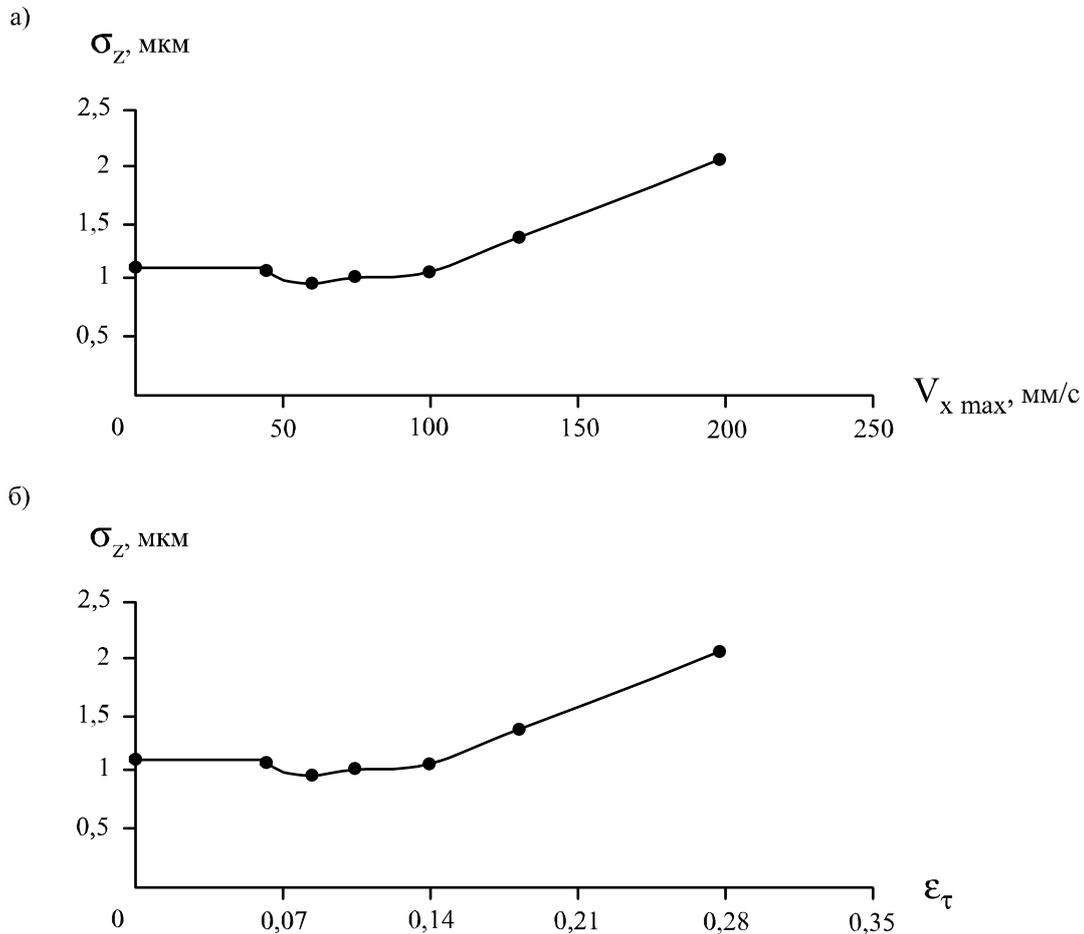


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования зависимости среднеквадратического отклонения измерений расстояния до объекта от скорости поперечного смещения поверхности объекта относительно щупа (а) и относительного смещения зондирующего пятна за время одного измерения (б) при фиксированной скорости сканирования опорного зеркала.

Fig. 3. The results of an experimental study based on standard deviations of measurements of distance to the object the speed of transverse displacement of the object surface relative probe (a) and the relative displacement of the probe spot during one measurement (б) at a fixed scan speed of the reference mirror.

Результаты измерений представлены на рис. 4. Измерения проводились для различных углов падения зондирующего излучения.

Как следует из полученных зависимостей, отдельные измерения можно считать независимыми, если при смещении объекта в поперечном направлении измерения будут проводиться с шагом порядка $7 \div 10$ мкм

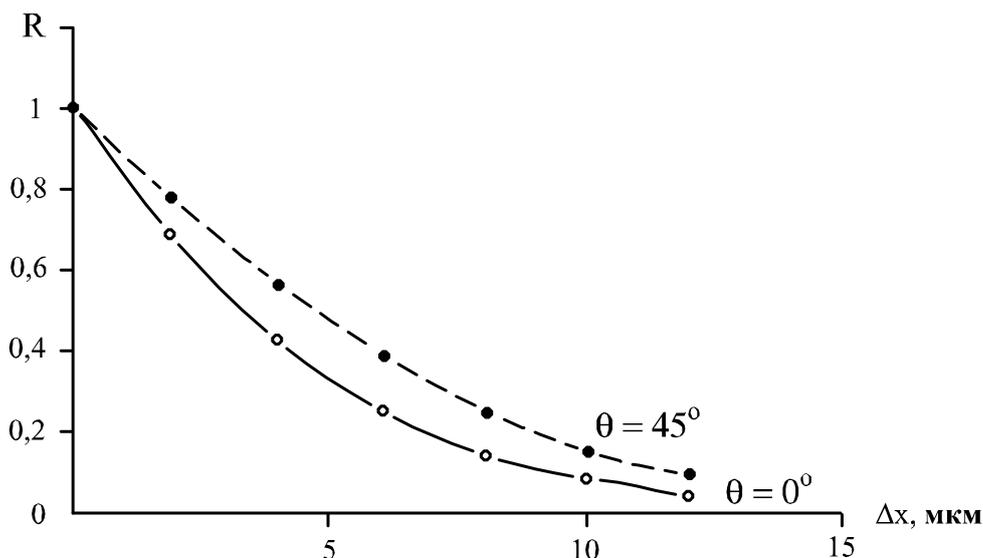


Рис. 4. Зависимость корреляционной функции измерения расстояния до объекта от поперечного смещения объекта Δx при различных углах падения θ зондирующего излучения.
 Fig. 4. The dependence of the correlation function measurement the distance to the object from the lateral shift Δx of the object at different angles of incidence θ of the probing radiation.

Заклучение

В настоящей статье предложен способ минимизации влияния спекл-модуляции интерференционного сигнала на результат измерений. На основе предложенного способа разработано устройство со сканированием опорного зеркала по периодическому закону. Определены соотношения между основными параметрами устройства, которые минимизируют ошибку измерения при спекл-модуляционной составляющей интерференционного сигнала.

Полученные выше результаты имеют важное практическое значение для оптического приборостроения, поскольку определяют дискретность измерений и границу допустимой скорости движения контролируемой поверхности при динамических измерениях.

Список литературы References

1. Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G. Range Sinding and velocimetry with directional discrimination using a modulated laser diode Michelson interferometer // Opt. Commun. 1994. Vol. 111. №1-2. PP. 1- 5.
2. Takeda M., Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimentional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces // Appl.Optics. 1994. Vol. 33. №34. PP. 7829-7837.
3. Olsson A., Tang C.L. Dynamic interferometry techniques for optical path length measurement // Appl.Optics. 1981. Vol.20. №20. PP. 3503-3507.
4. Hausler G., Lindner M.W. Coherence radar and spectral radar – new tools for dermatological diagnosis // F.Biomed. Opt. 1998. Vol.3. №1. PP. 21-31.
5. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. – М.: Машиностроение. 1985. С. 340.
 Malacara D. Optical production control: Engl. transl. under the editorship of Sosnova A. N. – М.: Mechanical Engineering. 1985. PP. 340.
6. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение. 1987. С. 264.
 Kreopalova G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Optical measurements. – М.: Mechanical Engineering. 1987. PP. 264.
7. Афанасьев В.А. Оптические измерения. – М.: Недра. 1968. С. 263.
 Afanasiev V. A. Optical measurements. – М.: Nedra. 1968. PP. 263.



8. Франсон М. Оптика спеклов // Пер. с франц. под ред. проф. Ю.И.Островского. – М.: Мир. 1980. С. 171.

Fransson M. Optics speckles // Fr. transl. under the editorship of Professor Y. I. Ostrovsky. – M.: Mir. 1980. PP. 171.

9. Большаков О.П., Котов И.Р., Хопов В.В., Майоров Е.Е. Исследование когерентно ограниченного шупа триггерного типа // Научное Приборостроение. – Издательство Наука. 2003. Т. 13. № 2. С. 47-51.

Bolshakov O. P., Kotov I. R., Khopov V. V., Maiorov E. E. The study of coherently a limited sensor of the trigger type // Nauchnoe Priborostroenie. – Publisher Nauka. 2003. Vol.13. No. 2. PP. 47-51.

10. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Когерентно-ограниченная интерферометрическая система в исследовании биологических объектов // Медицинская техника. 2012. №3 (237). С. 24-26.

Maiorov E. E., Prokopenko V. T. Coherent-limited interferometric system for the study of biological objects // Biomedical Engineering. 2012. No. 3 (237). PP. 24-26.

11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. – Издательство Наука. 2013. Т. 23. №2. С. 38-46.

Maiorov E. E., Prokopenko V. T. The study of the influence of the speckle structure on the formation of the interference signal and the measurement error // Nauchnoe Priborostroenie. – Publisher Nauka. 2013. Vol. 23. No. 2. PP. 38-46.

12. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. 2015. №11 (185). С. 26-31.

Maiorov E. E., Mashek A. C., Udachina S. V., Tsygankova G. A. Khaidarov G. G., Chernyak, T. A. Development of a computer interference of the control system of nonsmooth surfaces.// Instruments 2015. No. 11 (185). PP. 26-31.

13. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Черняк Т.А. Оптико-электронная компьютерная система для обнаружения внешних агентов в подповерхностных слоях кожного покрова // Медицинская техника. 2016. №2. С. 7-10.

Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Udachina S. V., Tsygankova G. A., Chernyak, T. A. Optical-electronic computer system for the detection of external agents at sub-surface layers of the skin // Biomedical Engineering. 2016. No. 2. PP. 7-10.

14. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Абрамян В.К., Зайцев Ю.Е., Хайдаров А.Г., Хайдаров Г.Г. Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографии для контроля геометрических параметров диффузно отражающих поверхностей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Vol. 60, № 4. PP. 331-339 DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-331-339.

Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Mashek A. C., Tsygankova G. A., Abramyan V. K., Zaicev Y. E., Khaidarov A. G., Khaidarov G. G. Application of cross-shear interferometry to holography for inspection of geometrical parameters of diffusely reflecting surfaces // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, No. 4. PP. 331-339