

СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ ПРИ РАБОТЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

В. Т. ПРОКОПЕНКО¹, Е. Е. МАЙОРОВ², А. Ч. МАШЕК³, Г. А. ЦЫГАНКОВА³,
Т. В. ЖАРКОВА⁴, М. В. ХОХЛОВА⁵, Е. А. ПИСАРЕВА⁴

¹ *Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*

² *Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС,
194044, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: majorov_ee@mail.ru*

³ *Военно-морской политехнический институт, 196604, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия*

⁴ *Михайловская военная артиллерийская академия, 195009, Санкт-Петербург, Россия*

⁵ *Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия*

Рассматривается работа интерферометра Майкельсона в двух режимах измерений — триггерном и сканирующем. Предложен способ устранения погрешности, вносимой продольной составляющей спекл-структуры при работе прибора в триггерном режиме. Рассмотрен случай относительно медленной поперечной составляющей случайной модуляции объектного сигнала, вследствие которой появляется продольная составляющая, приводящая к росту погрешности измерений. Сформулированы требования к параметрам микросканирования.

Ключевые слова: *интерферометр Майкельсона, спекл-структура, пространственное микросканирование, длина волны излучения, координатно-измерительное устройство*

Введение. Измерение рельефа поверхности с использованием когерентно-ограниченного излучения основано на зависимости контраста интерференционного поля от разности хода интерферирующих пучков [1—9]. До сих пор в качестве способа модуляции разности хода рассматривалось изменение оптической длины опорного плеча путем компенсационного перемещения опорного зеркала. Другим возможным способом модуляции является изменение оптической длины объектного плеча.

Указанные способы компенсационного изменения разности хода интерферирующих пучков лежат в основе построения интерферометров Майкельсона двух типов: сканирующего и триггерного [5—9].

Известно, что декорреляция спекл-полей, формирующих интерференционный сигнал при измерении высоты рельефа поверхности, вызывает изменение формы выходного сигнала при случайной модуляции и увеличение его длительности [10—13]. Эти факторы влияют на снижение точности измерений.

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 волны. В интерферометре сканирующего типа модуляция оптической разности хода осуществляется за счет перемещения опорного зеркала, фронт объектной волны не меняется. Поэтому за время одного измерения картина интерференционного поля в плоскости регистрации остается постоянной, меняется только контраст. В интерферометре триггерного типа опорное зеркало неподвижно, модуляция оптической разности хода происходит за счет движения самого щупа относительно объекта. Следова-

тельно, при наличии поперечной составляющей смещения щупа относительно поверхности происходит изменение картины спекл-интерференционного поля. На практике, в общем случае, контролируемая поверхность имеет сложную геометрическую форму. Поэтому наряду с чисто модуляционной составляющей — изменением оптической длины объектного плеча — присутствуют поперечная и продольная рассеянные составляющие спекл-структуры, приводящие к увеличению погрешности измерений. Существует хорошо известное правило при разработке способов противодействия влиянию спекл-структуры: спеклы „боятся“ статистики.

Итак, в работе [8] представлен способ минимизации влияния поперечной составляющей спекл-структуры на работу интерферометра Майкельсона посредством увеличения числа независимых измерений с последующим их усреднением. Этот способ реализован введением дополнительной модуляции разности хода интерферирующих лучей за счет сканирования опорного зеркала.

При совпадении направлений перемещения интерферометра и зондирующего излучения, а также при малой скорости поперечной составляющей введение лишь одной дополнительной модуляции в опорном канале может быть малоэффективным. Это обстоятельство обусловлено следующими причинами.

Как показано в работах [14, 15], диффузно отраженное излучение, кроме поперечной спекл-структуры, имеет также и продольную структуру. При выполнении условий когерентного сложения рассеянных компонентов продольная структура суммарной волны состоит из сигарообразных тел („сигар“), вытянутых вдоль направления распространения излучения. Как правило, продольный размер спекла в несколько раз превышает поперечный, поэтому основной вклад в погрешность измерений вносит продольная составляющая спекл-структуры.

В настоящей статье предложен способ устранения погрешности, вносимой продольной составляющей спекл-структуры при работе интерферометра Майкельсона в триггерном режиме измерений

Интерферометр Майкельсона сканирующего типа. Процесс измерений заключается в следующем. Интерферометр M крепится на подвижной части координатно-измерительного устройства на расстоянии, равном L_p от контролируемой поверхности P (рис. 1, a). Величина L_p — есть среднее расстояние от оптического щупа до поверхности, которое определяется параметрами оптической схемы и величиной δ_m — предполагаемой вариацией высоты рельефа. Далее производится относительное перемещение зондирующего луча S по поверхности объекта. Возможные варианты: перемещение координатно-измерительного устройства в плоскости, перпендикулярной зондирующему излучению; оптико-электронное сканирование лучом; перемещение самого объекта относительно луча. Цель перемещения — просканировать всю подлежащую контролю поверхность объекта.

В процессе движения осуществляется модуляция разности хода по периодическому закону посредством перемещения опорного зеркала. Во время модуляции фиксируются моменты нулевой разности хода, и производятся отсчеты $\Delta z'_i$ положения опорного зеркала, соответствующие этим моментам. Результатом измерений является функция [16—20]

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

где $\Delta z_i = \Delta z'_i$ — величина изменения рельефа в i -й точке поверхности относительно некоторой базовой плоскости $z = z_0$; x_i, y_i — координаты соответствующего положения зондирующего пятна в i -й точке поверхности, определяемые дискретностью съема информации.

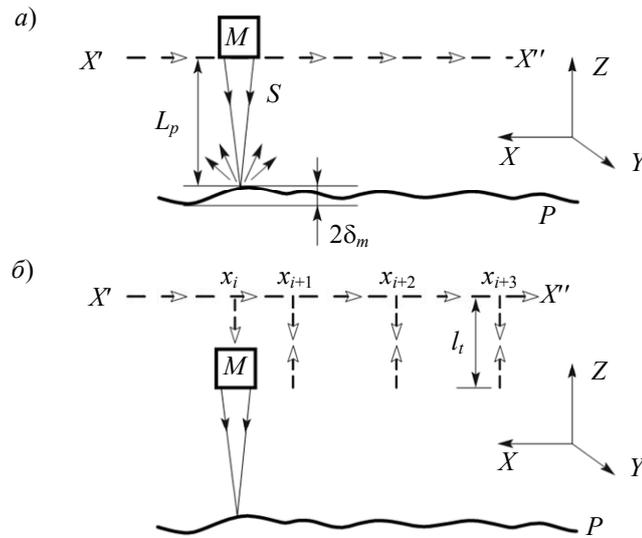


Рис. 1

Интерферометр Майкельсона триггерного типа. Работа интерферометра в триггерном режиме измерений также предполагает наличие координатно-измерительного устройства с возможностью перемещения по трем координатным осям X , Y , Z . Принципиальное отличие триггерного режима от сканирующего заключается в способе модуляции разности хода. Для каждой i -й зондируемой точки поверхности с координатами x_i, y_i величина Δz_i определяется не перемещением опорного зеркала, а перемещением непосредственно прибора по направлению к поверхности объекта вдоль оси Z (рис. 1, б). Если при работе интерферометра в сканирующем режиме производилась модуляция оптической длины опорного плеча, то в триггерном режиме модулируется длина объектного плеча [16—20]. Опорное зеркало при этом остается неподвижным. Интерферометр Майкельсона триггерного типа выполняет функции индикатора нулевой разности хода, а вся информация о функции поверхности $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$ снимается по показаниям координатно-измерительного устройства.

Пространственное микросканирование поверхности объекта зондирующим лучом (при работе интерферометра Майкельсона в триггерном режиме измерений). Поперечный размер отдельной „сигары“ — это размер „индивидуального“ спекла, определяемый формулой [15]

$$b_S = 1,22 \frac{\lambda L}{d}, \quad (1)$$

где b_S — характерный размер индивидуального спекла, L — расстояние от рассеивающей поверхности до плоскости наблюдения, λ — длина волны излучения, d — диаметр зондирующего пятна на поверхности объекта.

Продольный размер „сигары“ равен [15]

$$b_L = \frac{4\lambda L^2}{d^2}. \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), найдем отношение

$$\frac{b_L}{b_S} = \frac{L}{0,3d}.$$

При практически реализуемых значениях параметров $L = 100$ мм и $d = 40$ мкм получаем $b_L/b_S = 10^4$. Следовательно, при одинаковых скоростях перемещения интерферометра в продольном и поперечном направлениях изменение спекл-картины за счет „продольных“ спеклов происходит в 10^4 раз медленнее, т.е. практически не изменяется. Поэтому при наличии только одной поперечной составляющей движения невозможно реализовать совокупность

различных спекл-полей и, следовательно, произвести серию независимых измерений. По этой же причине к тому же результату приводит и относительно медленное перемещение зондирующего пятна по поверхности объекта.

В этом случае предлагается ввести вспомогательное микросканирование поверхности объекта зондирующим лучом. Амплитуду сканирования и дискретность отсчетов необходимо выбрать такими, чтобы реализуемые спекл-структуры были независимы. Для этого следует воспользоваться зависимостью корреляционной функции измерений от поперечного смещения зондирующего пятна [11, 20].

Пусть l_t — диапазон измерений (см. рис. 1, б), тогда время одного прохода интерферометра будет равно

$$\tau_t = l_t / V_t, \quad (3)$$

где V_t — скорость движения интерферометра.

Необходимо, чтобы время τ_t совпадало с периодом пространственного микросканирования. Тогда можно определить частоту сканирования $f_{ск}$:

$$f_{ск} = 1 / \tau_t. \quad (4)$$

Для того чтобы положение центра тяжести синтезированного пятна не смещалось, необходимо обеспечить равенство числа измерений в течение положительного и отрицательного полупериодов микросканирования. Из этого условия найдем частоту дополнительной модуляции оптической длины опорного плеча. Если τ_1 — время одного измерения, то $\tau_t / 2 = m \tau_1$, где m — число измерений за один полупериод микросканирования. Следовательно, частота модуляции в опорном плече равна

$$f_M = \frac{1}{\tau_1} = \frac{2mV_t}{l_t}. \quad (5)$$

Пространственное микросканирование поверхности зондирующим лучом проще всего осуществить с помощью совершающей угловые колебания плоскопараллельной стеклянной пластины H_c , введенной между микрообъективом O , формирующим зондирующий пучок, и источником излучения S (рис. 2). В результате расчетов получим следующее выражение:

$$A = \frac{(L_0 - f')h_c}{f' \cos\left(\frac{\sin \alpha_c}{n}\right)} \sin \left[\alpha_c - \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_c}{n}\right) \right], \quad (6)$$

где A — амплитуда микросканирования, h_c — толщина плоскопараллельной пластины, α_c — амплитуда колебаний пластины, n — показатель преломления материала пластины.

Пусть $L_0 = 120$ мм, $V_t = 50$ мм/с, $l_t = 100$ мкм, $m = 3$, $n = 1,5$, $f' = 15$ мм, $h_c = 0,5$ мм, $A = 10$ мкм. Тогда в соответствии с выражениями (3)—(6) получим $f_{ск} = 500$ Гц, $f_M = 3$ кГц, $\alpha_c = 0,01$ рад.

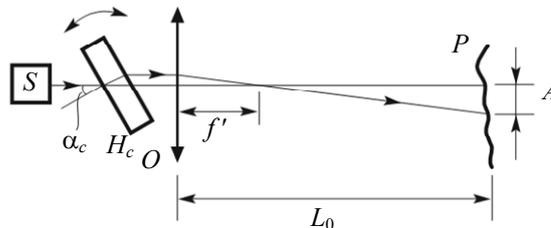


Рис. 2

Таким образом, используя полученные формулы, можно рассчитать все параметры микросканирования при работе интерферометра Майкельсона в триггерном режиме измерений.

Закключение. Представлена работа интерферометра Майкельсона в триггерном режиме измерений и предложен способ устранения погрешности, вносимой продольной составляющей спекл-структуры. Установлено, что при введении дополнительной модуляции длины объектного плеча за счет плоскопараллельной пластины продольная составляющая спекл-структуры отсутствует. Следовательно, точность измерений при работе интерферометра в триггерном режиме повышается в несколько раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dresel T., Hausler G., Venzke H.* Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, N 7. P. 919—925.
2. *Hasier G., Herrmann F.* Range sensing by shearing interferometry: influence of speckle // *Applied Optics*. 1988. Vol. 27, N 22. P. 4631—4637.
3. *Захарьевский А. Н.* Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
4. *Gu F., Hung Y., Chen F.* Iteration algorithm for computer-aided speckle interferometry // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, N 23. P. 5308—5317.
5. *Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А.* Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // *Приборы*. 2012. № 7 (145) С. 23—25.
6. *Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А.* Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 2 (78) С. 13—16.
7. *Majorov E. E., Prokopenko V. T.* A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // *Biomedical Engineering*. 2012. Vol. 46, N 3. P. 109—111.
8. *Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т.* Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // *Научное приборостроение*. 2013. Т. 23, № 2. С. 38—46.
9. *Майоров Е. Е.* Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // *Научное обозрение*. 2013. № 9. С. 329—332.
10. *Maïorov E. E., Prokopenko V. T., Sherstobitova A. S.* Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // *J. of Optical Technology*. 2013. Vol. 80, N 3. P. 162—165.
11. *Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т.* Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб: НИУ ИТМО, 2014. С. 193.
12. *Maïorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A.* A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // *Biomedical Engineering*. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306.
13. *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.
14. *Коломийцев Ю. В.* Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
15. *Франсон М.* Оптика спеклов / Пер. с франц.; Под ред. *Ю. И. Островского*. М.: Мир, 1980. 171 с.
16. *Gurov I. P., Gang L.* Automatic inspection of non-smooth surface displacements by interferometer with low-coherent illumination // *Proc. SPIE*. 1996. Vol. 2899. P. 230—239.
17. *Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А.* Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25, № 4. С. 61—66.
18. *Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Черняк Т. А.* Исследование интерферометра сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм // *Научное приборостроение*. 2017. Т. 27, № 2. С. 32—40.
19. *Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Пономарев С. Е.* Разработка оптического прибора для обработки голографических интерферограмм применительно к локальным наклонам диффузно-отражающих объектов // *Приборы*. 2017. № 6. С. 25—28.

20. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Курлов А. В., Хохлова М. В., Кирик Д. И., Капралов Д. Д. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 33—37.

Сведения об авторах

- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра световых технологий и оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Александр Чеславович Машек** — Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; преподаватель; E-mail mashek50@mail.ru
- Галина Александровна Цыганкова** — канд. физ.-мат. наук; Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; преподаватель; E-mail galusinka@mail.ru
- Татьяна Викторовна Жаркова** — канд. техн. наук, доцент; Михайловская военная артиллерийская академия, кафедра математических, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин; E-mail: unzharg@mail.ru
- Марина Владимировна Хохлова** — канд. пед. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра физики; E-mail: mvxoh@mail.ru
- Елена Алексеевна Писарева** — Михайловская военная артиллерийская академия, кафедра математических, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин; ст. преподаватель; E-mail: episareva@icloud.com

Поступила в редакцию
20.11.17 г.

Ссылка для цитирования: Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Жаркова Т. В., Хохлова М. В., Писарева Е. А. Способ устранения погрешности продольной составляющей спекл-структуры при работе интерферометра Майкельсона // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 3. С. 267—273.

METHOD FOR ELIMINATING THE ERRORS OF LONGITUDINAL COMPONENT OF THE SPECKLE STRUCTURE WHEN OPERATING MICHELSON INTERFEROMETER

V. T. Prokopenko¹, E. E. Maiorov², A. Ch. Mashek³, G. A. Tsygankova³,
T. V. Zharkova⁴, M. V. Khokhlova⁵, E. A. Pisareva⁴

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

²Interregional Institute of Economics and Law under the EurAsEC IPA,
194044, St. Petersburg, Russia
E-mail: majorov_ee@mail.ru

³Naval Polytechnical Institute, 196604, St. Petersburg, Pushkin, Russia

⁴Mikhailovskaya Military Artillery Academy, 195009, St. Petersburg, Russia

⁵A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia

Analysis of Michelson interferometer operation in two measurement modes: touch-trigger and scanning, is carried out. A method is proposed for eliminating measurement errors introduced by longitudinal component of the speckle structure when the instrument is in trigger mode. The case of a relatively slow transverse component of random modulation of object signal is considered; the component is responsible for the emergence of the longitudinal component leadings to increased measurement errors. Requirements to the elements and settings of micro-scan are formulated.

Keywords: Michelson interferometer, speckle structure, spatial micro-scanning, radiation wavelength, coordinate measuring device

Data on authors

- Victor T. Prokopenko** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Light Technologies and Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; Interregional Institute of Economics and Law under the EurAsEC IPA, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: majorov_ee@mail.ru

- Alexander Ch. Mashek** — Naval Polytechnical Institute, Department of Physics; Lecturer; E-mail mashek50@mail.ru
- Galina A. Tsygankova** — PhD; Naval Polytechnical Institute, Department of Physics; Lecturer; E-mail galusinka@mail.ru
- Tatiana V. Zharkova** — PhD, Associate Professor; Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Department of Mathematical, Natural-Scientific, and General Professional Subjects; E-mail: unzhar@mail.ru
- Marina V. Khokhlova** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Physics; E-mail: mvxox@mail.ru
- Elena A. Pisareva** — Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Department of Mathematical, Natural-Scientific, and General Professional Subjects; Senior Lecturer; E-mail: episareva@icloud.com

For citation: Prokopenko V. T., Maiorov E. E., Mashek A. Ch., Tsygankova G. A., Zharkova T. V., Khokhlova M. V., Pisareva E. A. Method for eliminating the errors of longitudinal component of the speckle structure when operating Michelson interferometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 3. P. 267—273 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-3-267-273