

УДК 681.787.7: 622.276

© Е. Е. Майоров, А. Ч. Машек, С. В. Удахина, Г. А. Цыганкова,
Г. Г. Хайдаров, Т. А. Черняк

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НЕГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе представлена компьютерная интерференционная система измерения негладких поверхностей (возможные вариации рельефа), а также приведены ее преимущества над традиционными системами контроля. Предложены алгоритмы обработки интерференционного сигнала по методу дифференцирования огибающей и методу площадей. Простое математическое выражение $\Delta z = N_z h_d$ дает информацию о расстоянии до контролируемой поверхности объекта. Показана оптико-электронная компьютерная обработка интерференционного сигнала, рассмотрены блок-схемы синхронизации и формирования сигналов управления.

Кл. сл.: компьютерная интерференционная система, доплеровская частота, синхронизация, опорное зеркало, рельеф поверхности

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стремительными темпами развиваются оптико-электронные компьютерные системы (ОЭКС) в оптическом приборостроении. Одно из направлений (ОЭКС) занимают компьютерные интерференционные системы (КИС) контроля негладких поверхностей [1–4]. КИС удовлетворяют требованиям производственного контроля, малогабаритны, бесконтактны и просты в эксплуатации. Работа этих систем основана на анализе светового излучения, отраженного от измеряемой поверхности. Основные преимущества КИС перед традиционными голографическими интерференционными системами в том, что на них не накладываются какие-либо требования к повышенной виброзащите, а также они пригодны для решения динамических задач. Поэтому это направление в оптическом приборостроении, относительно новое, интенсивно развивается последние 8–10 лет.

ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для измерения поверхности объекта со сложной вариацией рельефа была разработана компьютерная интерференционная система (КИС), схема которой приведена на рис. 1. Схема построена на основе интерферометра Майкельсона, в качестве источника излучения

используется суперлюминесцентный диод 1 с длиной волны $\lambda = 1.3$ мкм, длиной когерентности $l_c =$

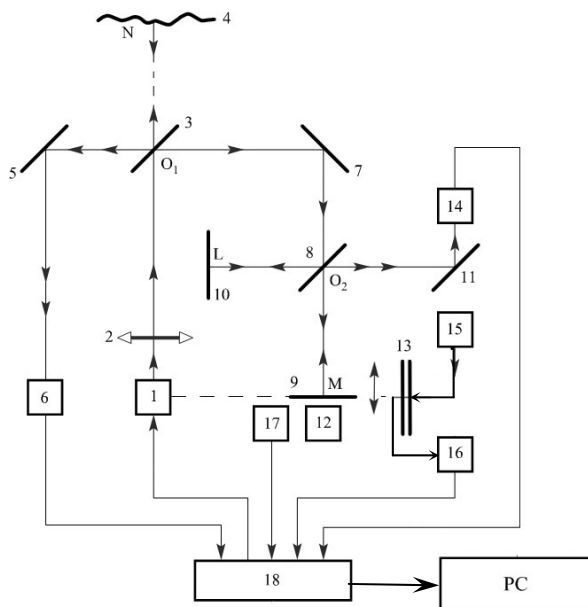


Рис. 1. Схема компьютерной интерференционной системы.

1, 15 — суперлюминесцентные диоды; 2 — микробоъектив; 3, 8 — светоделители; 4 — объект; 5, 7, 9, 10, 11 — зеркала; 6, 14, 16 — фотоприемники; 12 — модулятор; 13 — дифракционные решетки; 17 — датчик скорости; 18 — блок электронной обработки сигналов; PC — компьютер

$= 20$ мкм, мощностью излучения 0.5 мВт. Микрообъектив 2 ($10\times$, $f = 15.5$ мм, $A = 0.3$) фокусирует излучение источника на контролируемую поверхность объекта 4 и на опорную поверхность (зеркало 9).

В процессе измерений производится модуляция оптической разности хода $O_1M - O_1N$: в триггерном режиме — за счет изменения расстояния между оптическим щупом и поверхностью объекта (O_1N), в сканирующем режиме — за счет сканирования опорного зеркала 9 (O_1M). Последнее крепится на пружинном параллелограммном механизме, колебания которого возбуждаются электромагнитным модулятором 12 . Сканирование опорного зеркала производится также и в триггерном режиме при введении дополнительной модуляции в опорном канале. Момент равенства оптических длин плеч интерферометра O_1M и O_1N соответствует максимуму контраста интерференционного поля и, следовательно, максимуму сигнала фотоприемника 6 . При сканировании зеркала 9 изменение оптической длины опорного плеча интерферометра определяется с помощью пары голографических дифракционных решеток 13 , одна из которых неподвижна, другая жестко связана со сканирующим зеркалом 9 . Направление взаимного смещения дифракционных решеток на схеме обозначено стрелкой. Шаг решеток равен 1.5 мкм. Решетки освещаются источником 15 , сигнал регистрируется фотоприемником 16 . Начало отсчета определяется с помощью второго интерферометра Майкельсона, образованного светоделителем 8 , зеркалом 10 и общим для двух интерферометров сканирующим зеркалом 9 . Начало отсчета соответствует максимуму сигнала фотоприемника 14 , который наблюдается в момент равенства длин плеч O_2L и O_2M . Этот сигнал является опорным: относительно него отсчитывается временное положение максимума информационного сигнала фотоприемника 6 . Очевидно, что размер зондирующего пятна на поверхности объекта определяет амплитуду информационного сигнала. Поэтому при проведении измерений необходимо, чтобы зондирующее излучение было сфокусировано на поверхности объекта. Для выполнения этого требования в экспериментальном устройстве использовалось следующее техническое решение: пространственное положение источника 1 также модулировалось во времени вдоль оси излучения с частотой сканирования опорного зеркала 9 . При этом требование фокусировки излучения на поверхности объекта выполнялось при соотношении амплитуд сканирования источника и опорного зеркала $1 : 60$. Основанием для определения этого соотношения являлись расстояние до объекта (120 мм) и фокусное расстояние микрообъектива 2 (15.5 мм).

КИС позволяет измерять относительную величину расстояния до объекта: расстояние до объекта отсчитывается от некоторой базовой плоскости, соответствующей временному положению максимума опорного сигнала фотоприемника 14 . Искомая информация содержится во временном интервале между максимумами сигналов фотоприемников 6 и 14 . Указанный временной интервал находится путем подсчета импульсов фотоприемника 16 при сканировании дифракционных решеток 13 .

Для получения искомой информации о рельефе поверхности сигналы фотоприемников 6 , 14 и 16 подвергаются аналоговой и цифровой обработкам. Ниже рассматриваются алгоритмы обработки сигнала по двум методам: методу дифференцирования огибающей и методу площадей.

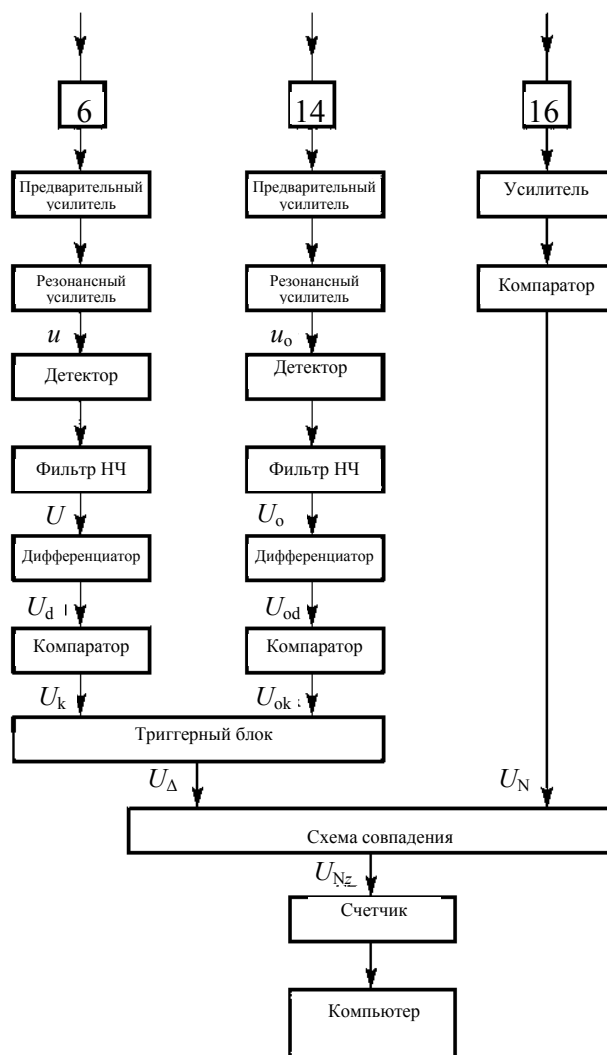


Рис. 2. Блок-схема оптико-электронной компьютерной обработки

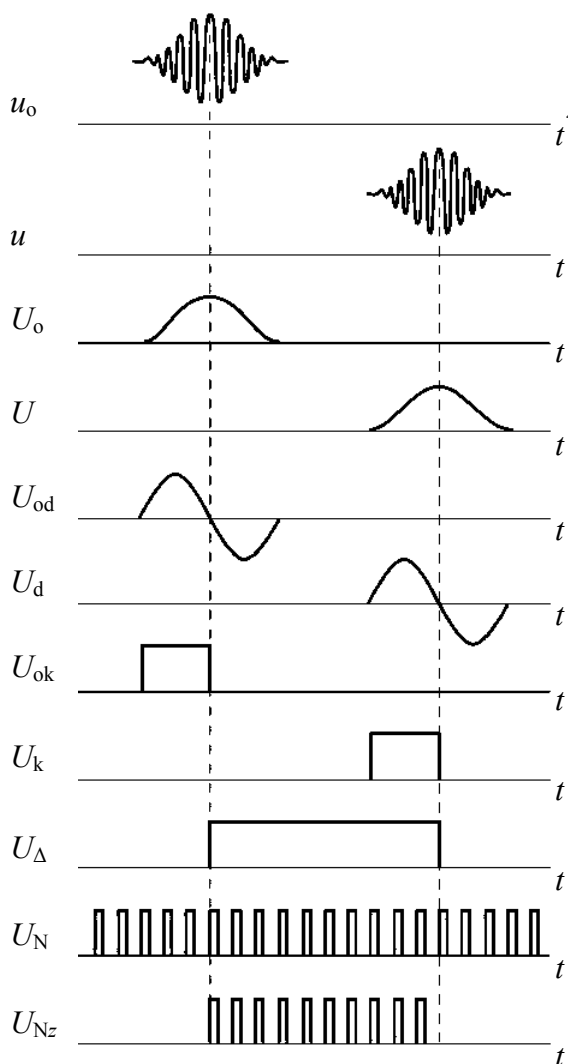


Рис. 3. Оптико-электронная компьютерная обработка интерференционного сигнала методом дифференцирования огибающей

Математическое моделирование интерференционного сигнала проводилось при следующих параметрах системы: скорость перемещения опорного зеркала $v = 400$ мм/с, длительность выходного сигнала по уровню $0.1 \tau = 50$ мкс, размер зондирующего пятна на поверхности $d = 30$ мкм, диапазон измерений $h = 3.8$ мм, погрешность измерений $\Delta = 1$ мкм.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА ПО МЕТОДУ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ

Блок-схема оптико-электронной компьютерной

обработки и соответствующие сигналы показаны на рис. 2 и 3. Сигналы фотоприемников 6 и 14 проходят по двум идентичным каналам. В усилительном каскаде производится предварительное усиление сигнала и резонансное усиление на доплеровской частоте [3–8], определяемой выражением

$$f_c = \frac{2v}{\lambda}, \quad (1)$$

где v — скорость сканирования опорного зеркала на линейном участке; λ — длина волны излучения.

После детектирования и фильтрации нижних частот происходит формирование огибающих U и U_0 информационного и опорного сигналов (u и u_0 соответственно). Продифференцированные сигналы U_d и U_{od} подаются на компараторы. С выходов компараторов снимаются прямоугольные импульсы U_k и U_{ok} , задние фронты которых соответствуют положениям максимумов огибающих сигналов U и U_0 . По задним фронтам сигналов U_k и U_{ok} триггерный блок формирует меандр U_Δ , длительность которого равна временному интервалу между опорным и информационным сигналами. Меандр U_Δ подается на схему совпадения, на которую одновременно подаются импульсы U_N с фотоприемника 16 после усиления и преобразования. С выхода схемы совпадения снимается гребенка импульсов U_{Nz} , количество которых определяется шириной временных ворот U_Δ . Окончательно информация о расстоянии до поверхности

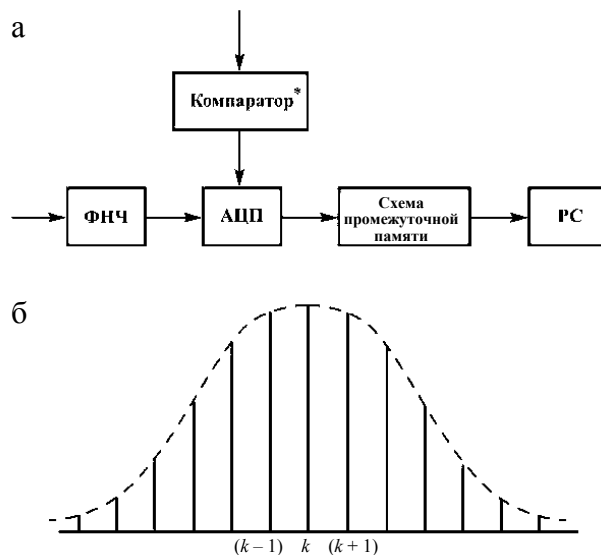


Рис. 4. Оптико-электронная компьютерная обработка интерференционного сигнала методом площадей.

а — блок-схема электронной обработки; б — формирование выборки огибающей сигнала; k -я выборка делит площадь под огибающей на две равные части

объекта Δz выводится на дисплее компьютера

$$\Delta z = N_z h_d, \quad (2)$$

где N_z — количество импульсов U_{Nz} ; h_d — шаг дифракционных решеток (1.5 мкм).

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА ПО МЕТОДУ ПЛОЩАДЕЙ

В этом случае огибающая интерференционного сигнала U подается на вход аналого-цифрового преобразователя (рис. 4). Тактовая частота задается импульсами U_N . Компьютер производит суммирование выборок сигнала U_b . Поскольку интервал между выборками постоянен, сумма выборок S_b пропорциональна площади под огибающей. Далее сумма S_b делится на 2 и находится величина $S_b/2$. После этого производится последовательное сложение выборок, начиная с первой, и вычисляется сумма $\sum_{i=1}^k U_b(i)$ [5–9]. При этом каждый раз при увеличении суммы на одну выборку получаемая

сумма сравнивается с величиной $S_b/2$, соответствующей половине площади под огибающей. Суммирование прекращается, когда после добавления k -й выборки наступает равенство

$$\sum_{i=1}^k U_b = S_b/2.$$

Временное положение k -й выборки принимается в качестве положения максимума информационного сигнала. Дальнейшее определение временного интервала U_Δ производится так же, как в методе дифференцирования огибающей.

Управление работой КИС осуществляется с помощью схемы синхронизации (рис. 5). С выхода датчика измерения скорости сканирования опорного зеркала v снимается синусоидальный сигнал U_v , который подается на компаратор. Последний формирует прямоугольные импульсы U_{vo} , длительность которых равна временному интервалу между моментами нулевой скорости сканирования опорного зеркала. По передним

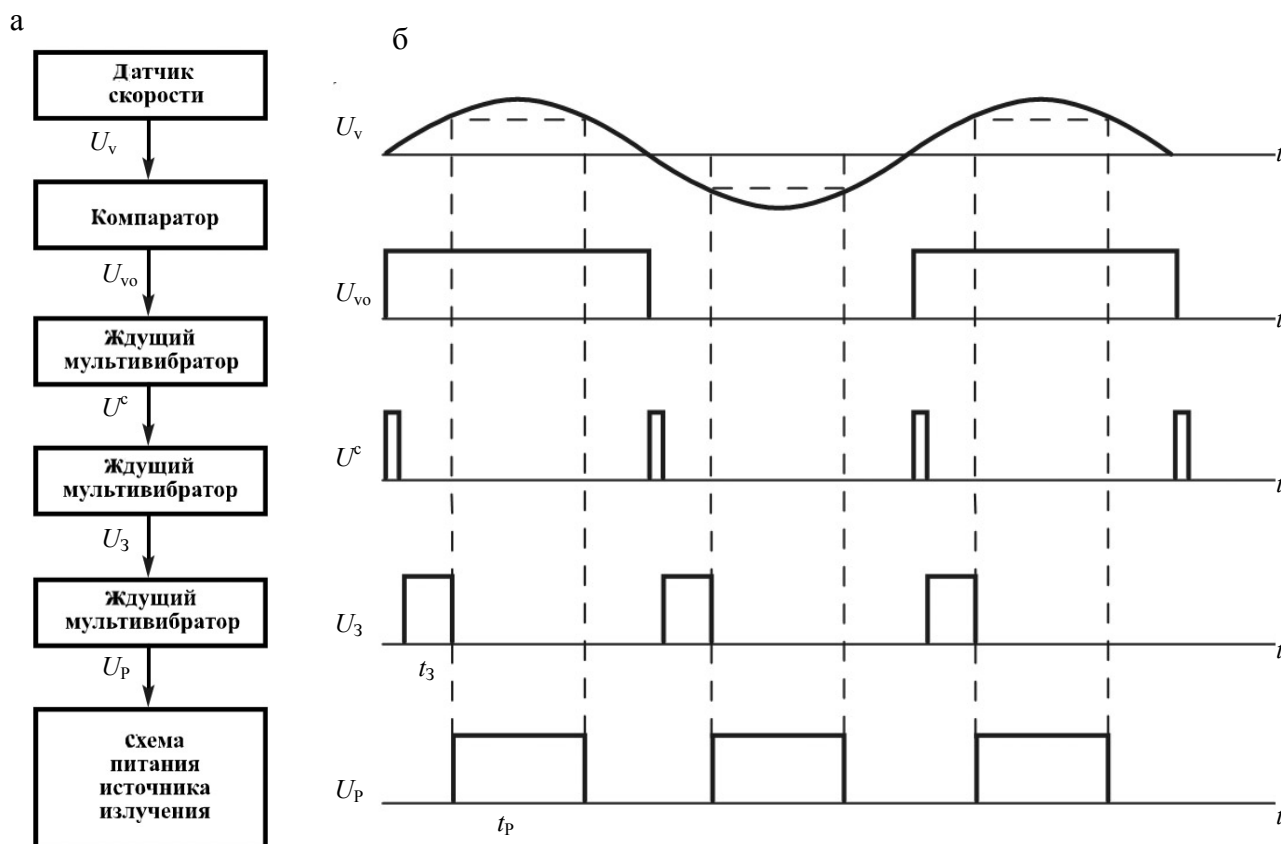


Рис. 5. Блок-схема синхронизации (а) и формирование сигналов управления (б)

и задним фронтам импульсов $U_{\text{во}}$ формируются синхримпульсы U^c , которые запускают схему формирования импульсов задержки U_3 . По задним фронтам импульсов задержки вырабатывается прямоугольный импульс U_p , который является разрешающим сигналом на подачу напряжения питания $U_{\text{п}}$ источника освещения 1 (рис. 1).

Формирование импульсов задержки необходимо для того, чтобы из графика зависимости скорости сканирования от времени (U_v) выделить участки с максимальной скоростью, и на которых $v \approx \text{const}$. Постоянство скорости сканирования опорного зеркала v в свою очередь обеспечивает постоянство частоты сигнала f_c (1). Длительности t_3 , t_p импульса задержки U_3 и меандра U_p определяются периодом сканирования. При экспериментальных исследованиях t_3 и t_p равнялись $T_M/8$ и $T_M/4$ соответственно, где T_M — период сканирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения КИС для исследования негладких поверхностей, а также показана актуальность использования этих систем. Приведены алгоритмы обработки интерференционного сигнала по методу площадей и дифференцирования огибающей. Измеряемое расстояние до поверхности объекта определяется простым выражением $\Delta z = N_z h_d$. Наглядно продемонстрирована оптико-электронная обработка интерференционного сигнала представленными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: Издат. НИУ ИТМО, 2014. 193 с.
2. 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.
3. Майоров Е.Е. Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 329–332.

4. 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. Т. 78, № 2. С. 13–16.
5. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Прокопенко В.Т., Чистякова Н.Я. Исследование метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 59–65.
6. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. Москва: СОО "МНТОП и М", 2012. Т. 145, № 7. С. 23–25.
7. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Прокопенко В.Т., Хайдаров Г.Г. Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографической интерферометрии для контроля диффузно отражающих объектов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 4: Физика, химия. 2012. Вып. 4. С. 31–35.
8. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Применение двухчастотного излучения для реализации принципов гетеродинной голографической интерферометрии с одним опорным пучком // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 43–45.
9. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С. Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 3. С. 47–51.

Санкт-Петербургский университет управления и экономики (Майоров Е.Е., Удахина С.В., Черняк Т.А.)

Военно-морской политехнический институт, г. Пушкин (Машек А.Ч., Цыганкова Г.А.)

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Хайдаров Г.Г.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич, majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 20.10.2015

ALGORITHMS OF PROCESSING OF THE INFORMATION SIGNAL OF THE COMPUTER INTERFERENCE CONTROL SYSTEM OF NON-SMOOTH SURFACES

**E. E. Mayorov¹, A. C. Mashek², S. V. Udakhina¹,
G. A. Tsygankova², G. G. Chaydarov³, T. A. Chernyak¹**

¹*Saint-Petersburg University of Management and Economics, RF*

²*Naval Polytechnical Institute, Pushkin, RF*

³*Saint Petersburg State Technological Institute (technical university), RF*

The article a computer interference control system of non-smooth surfaces (variations of the relief), and advantages over traditional control systems are presented. Algorithms of processing of the interference signal according to the method of differentiation and the method of squares are conducted. The mathematical expression that gives information about the distance to the measured surface of the object is received. Optoelectronic computer processing of the interference signal, the block diagram of the synchronization and generation of control signals are considered. Description of computer interference and formation of the desired information on the surface topography of the object are considered. Algorithmic processing of the information signal of the system as an effective tool for the control of the surface shape of the object are presented.

Keywords: computer system interference, Doppler frequency, synchronization, reference mirror, surface relief

REFERENCES

1. Mayorov E.E., Prokopenko V.T. *Interferometriya diffuzno otrazhayuschich ob'ektov* [Interferometry diffuzno the reflecting objects]. Saint-Petersburg, NIU ITMO Publ., 2014. 193 p. (In Russ.).
2. Mayorov E.E., Prokopenko V.T. [Study of the speckle structure influence on the formation of the interference signal and measurement error]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Science Instrumentation], 2013, vol. 23, no. 2, pp. 38–46. (In Russ.).
3. Mayorov E.E. [Method of elimination of influence of a decorrelation of speckle-fields on the accuracy of measurements and dynamic range of an interferential signal]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2013, no. 9, pp. 329–332. (In Russ.).
4. Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Optimization of dynamic parameters of the optical probe of trigger type]. *Nauchno-technicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical messenger of information technologies, mechanics and optics], 2012, vol. 78, no. 2, pp. 13–16. (In Russ.).
5. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Prokopenko V.T., Chistyakova N.Ya. [Research of metrological characteristics of a measuring optical-mechanical head]. *Izv. vuzov. Priborostroenie* [News of higher education institutions. Instrument making], 2012, vol. 55, no. 7, pp. 59–65. (In Russ.).
6. Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Calculation of parameters of scanning of the interferometric monitoring system of a form diffuzno the reflecting objects]. *Pribory* [Devices], Moscow, SOO "MNTOP i M" Publ., 2012, vol. 145, no. 7, pp. 23–25. (In Russ.).
7. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Prokopenko V.T., Chaydarov G.G. [Application of a cross and shift interferometry in a holographic interferometry for control diffuzno the reflecting objects]. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Ser. 4: Fizika, khimiya* [Bulletin of the St. Petersburg university. Ser. 4: Physics, chemistry], 2012, no. 4, pp. 31–35. (In Russ.).
8. Mayorov E.E., Prokopenko V.T. [Use of two-frequency radiation for realization of the principles of a heterodyne holographic interferometry with one basic bunch]. *Izvestiya vysshich uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrument making], 2012, vol. 55, no. 12, pp. 43–45. (In Russ.).
9. Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. [Research of optical-electronic system of interpretation of holographic interferograms]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical Journal], 2013, vol. 80, no. 3, pp. 47–51. (In Russ.).

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

Article received in edition: 20.10.2015