

УДК 535.411.854

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БОЛЬШИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. Е. Трубилина, Д. С. Хайдуков

*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: vigguzhov@gmail.com*

Рассматривается возможность определения деформаций крупногабаритных объектов методом структурированного освещения, основанным на проекции картин синусоидальных полос на поверхность исследуемого объекта. Использование пошагового фазового сдвига позволяет выделять информацию о фазовом распределении, отображающем рельеф поверхности. Сравнение фазовых распределений до и после воздействия на объект даёт возможность установить поле деформаций. Представлен новый метод нахождения фазовых разностей, значительно снижающий требования к алгоритмам устранения фазовой неоднозначности. Разработана экспериментальная установка для определения предельной чувствительности метода при исследовании деформаций защемлённой консольной балки. Показано, что чувствительность метода составляет менее 10 мкм на свободном конце балки.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние объекта, интерферометрия, структурированное освещение, пошаговый фазовый сдвиг.

DOI: 10.15372/AUT20200409

Введение. Разработка новых неразрушающих методов исследования напряжённо-деформированного состояния объектов, а также создание на их основе информационно-измерительных систем является актуальной задачей современного приборостроения. Среди множества существующих неразрушающих методов контроля следует выделить ряд методов, получивших название оптических.

Если поверхность объекта оптически гладкая, то можно применять интерференционные методы измерений. В качестве эталона используется длина волны источника излучения, которая является физической константой. Эти методы позволяют проводить измерения с точностью до сотых и тысячных долей длины волны [1–4].

С появлением голографии появилась возможность проведения интерферометрических измерений напряжённо-деформированного состояния объектов не только прозрачных и зеркальных (т. е. объектов с оптически чистой поверхностью), но и диффузно отражающих объектов. Голографическая интерферометрия — один из наиболее перспективных методов контроля такого состояния объектов [5–10]. Однако развитие методов голографической интерферометрии ограничивается необходимостью применения фотоматериалов с большим разрешением для регистрации промежуточных голограмм. Использование фотопластинок связано со сложными химическими процессами при обработке. Кроме того, очень сложно сформировать опорный пучок большого размера для контроля крупных объектов. Поэтому измерительные системы на базе этих методов применяются в основном в лабораторных условиях для контроля сравнительно небольших объектов.

Для оптически грубых поверхностей хорошо показывают себя методы, основанные на эффекте муара, так как они менее чувствительны к среде и диапазон их измерений существенно больше, чем у интерференционных методов. Однако точность методов муара уступает методам голографической интерферометрии [2, 11]. Поскольку для определения

деформаций необходимо измерять производные поля смещений, использование подобных методов для исследования напряжённо-деформированного состояния объектов не представляется возможным.

Метод структурированного излучения в основном применяется для измерения профиля рельефа сравнительно небольших объектов из-за недостаточной чувствительности [12].

В данной работе рассматривается возможность определения деформаций больших объектов на основе фазового метода структурированного освещения. С этой целью предлагается новый метод формирования поля разности фаз, обладающий высокой чувствительностью. Тогда, измеряя объект до и после воздействия на него некоторой силы, можно найти деформацию объекта как разность его профилей до и после нагружения.

Фазовый метод структурированного освещения. Метод Гартмана — один из наиболее ранних способов определения кривизны оптических элементов [13]. Первые датчики Гартмана представляли собой плоские пластины с небольшими отверстиями, которые работали как собирающие линзы. По расположению пятен в фокальной плоскости (гартманогамме) можно судить об искривлённости волнового фронта. Широко известен также метод фотограмметрии, с помощью которого пространственные координаты точек поверхности объекта находятся путём измерений, выполняемых по серии фотографий объекта, снятых из разных положений. При этом на каждом изображении отыскиваются общие точки. Затем луч зрения проводится от местоположения фотоаппарата до точки на объекте. Пересечение этих лучей и определяет положение точки в пространстве. Для повышения точности определения общих точек в фотограмметрических методах требуется создание специальных, в том числе световых, меток. Их обнаружение является сложной технической задачей [14]. Погрешность фотограмметрических систем измерения зависит от расстояния до объекта. Так, например, для фотограмметрической системы на базе камеры V-STARS/N Platinum точность измерений рассчитывается по формуле $5 \text{ мкм} + 5 \text{ мкм/м}$ [15].

В настоящее время проекцию эталонных картин чаще всего осуществляют с помощью оптических проекционных систем. На объект проецируется некоторая картина (структурированная подсветка), ее искажения, вызванные формой объекта, регистрируются фотокамерой или видеокамерой [12]. Современные способы, основанные на структурированном освещении, проецируют специальные картины, искажения которых и определяют форму поверхности [16–19]. К наиболее простым картинам относятся: набор точек, линии, сетки. Линии можно проецировать с помощью специальных лазерных указок или слайд-проекторов, но наиболее простой способ — проекция линий на объект обычным жидкокристаллическим или лазерным проектором. Камера, расположенная немного в стороне от проектора, фиксирует форму сети и вычисляет расстояние до каждой точки в поле зрения. Однако методика, основанная на фиксации смещения точек относительно шаблона и нахождении по ним z -координаты с помощью триангуляционных технологий, не позволяет определять рельеф поверхности с достаточной для установления деформаций точностью.

Фазовые методы структурированного освещения очень похожи на методы проекций картин [20] (во многих источниках они рассматриваются как определённый тип структурированного освещения) и заключаются в том, что на поверхность объекта проецируется система синусоидальных полос. Методы вычисления фазовых разностей, разработанные для интерференционных и голографических систем [21–23], подходят и для методов определения профиля при освещении объекта картинами синусоидальных полос. Это объясняется тем, что и при интерференции двух пучков, и при проекции полос картина интенсивности будет характеризоваться следующим выражением:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y)[1 + V(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y) + \delta_i)], \quad (1)$$

где $I_0(x, y)$ — средняя интенсивность; $V(x, y)$ — средняя видность или контраст; $\Delta\varphi$ — разность фаз между исследуемым и идеальным распределением полос; δ_i — известный фазовый сдвиг. Изменение профиля зависит от разности фаз $\Delta\varphi$ и геометрии оптической установки.

Метод сдвиговой фазовой интерферометрии (PSI — Phase Shift Interferometry), впервые предложенный в [24, 25], привлёк внимание специалистов возможностью получения измерительной информации в каждой точке интерференционной картины, не прибегая к анализу окрестности этой точки [21, 26–27]. Метод пошагового фазового сдвига заключается в добавлении известного фазового сдвига к распределению синусоид при проекции полос. В оптических проекционных системах формируется серия синусоидальных картин с заданным сдвигом фаз. Общая формула для компьютерного моделирования синусоидальных картин, ориентированных вдоль оси x , имеет вид

$$I_i(x, y) = a_0 + a \cos((2\pi N_p/N_x)x - \delta_i), \quad (2)$$

где a_0 — средняя яркость, a — амплитуда, N_x — число точек в массиве, N_p — требуемое число полос, δ_i — фазовый сдвиг.

Для нахождения разности фаз, которая пропорциональна рельефу поверхности объекта, проецируем систему полос (2) на объект, фиксируем $I_i(x, y)$ и решаем систему уравнений (1) относительно $\Delta\varphi = (2\pi N_p/N_x)x$. В [28] описан обобщённый алгоритм решения систем трансцендентных уравнений (1) для произвольных фазовых сдвигов.

Схема измерений. Объектом является зашкреплённая консольная балка, один конец которой закреплён, а на другой конец балки прилагается некоторая нагрузка. Эта схема измерения хорошо изучена, поэтому позволяет сравнивать экспериментальные данные с результатами теоретических расчётов. В качестве балки используется прессованный профиль из алюминиевых сплавов (рис. 1). Его сечение имеет вид неравнобокого уголка с размерами полок: $h = 65$ мм, $b = 10$ мм, толщина профиля $\Delta = 1,2$ мм. Модуль упругости материала балки $E = 7 \cdot 10^9$ Па. Длина $L = 0,5$ м. Момент инерции сечения $I = 5,194 \cdot 10^{-8}$ м⁴, величина сосредоточенной силы P , приложенной на конце балки, 4,5 Н.

Устройство нагружения представляет собой серийный микрометр, который служит также и для контроля величины изгиба свободного края балки.

Схема измерений и реализующая их измерительная система показаны на рис. 2. Здесь $d = 1,5$ м — расстояние между проектором и камерой, $L = 2$ м — расстояние от проектора до плоскости объекта, $EF = 500$ мм — длина балки.

При уменьшении размера периода проецируемой синусоидальной картины необходимы проекторы с большим пространственным разрешением. В данной работе использовался 4К-проектор VPLVW260ES, который обеспечивает разрешение 4096×2160 точек.

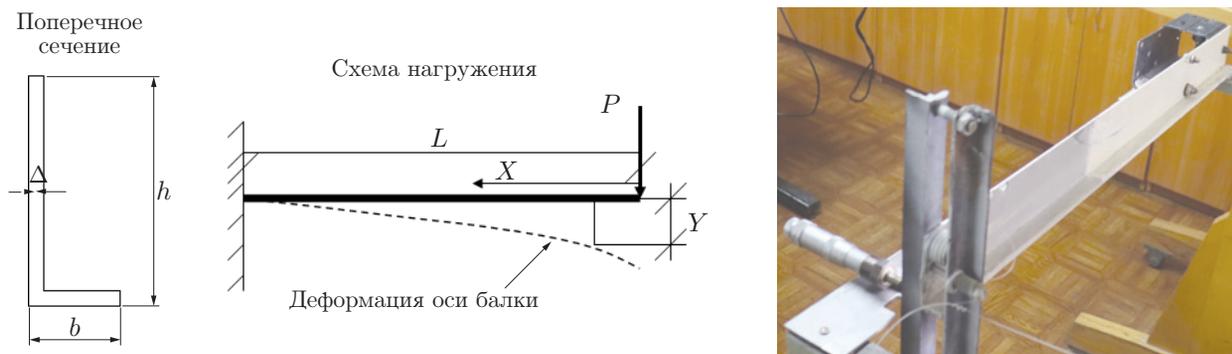


Рис. 1. Схема нагружения и форма сечения исследуемого образца

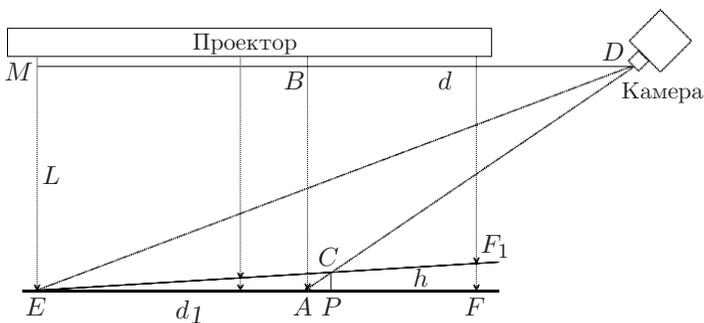


Рис. 2. Схема измерений (слева) и общий вид установки (справа)

Для регистрации использовалась серийная фотокамера CANON EOS M50, сопряжённая с компьютером. В фотокамере установлена матрица CMOS объёмом 24,1 Мп и размером $22,3 \times 14,9$ мм (формат APS-C). Максимальное разрешение при вводе одного кадра 6000×4000 .

Определение деформаций. Для нахождения поля деформаций поверхности задаётся фазовая разность профиля двух состояний объекта: до деформации и после неё.

При определении профиля объекта используются изображения объекта, освещённого синусоидальными полосами. По набору синусоидальных полос методом пошагового фазового сдвига устанавливается фазовое распределение поля, отражённого от объекта.

Пусть область регистрации объекта на матрице фотоприёмника по оси X 4000 точек, проецируем 20 полос (200 точек на полосу). В результате измерений получим поле фаз с периодом, определяемым размером проецируемых синусоид (рис. 3).

Вычитать фазовые распределения можно только после устранения фазовой неоднозначности. Однако наличие шумов делает эту процедуру достаточно сложной. При упругих деформациях величина смещения небольшая, поэтому можно воспользоваться процедурой, описанной в [29]. Вычислим для фазовых сдвигов δ_i картины полос с помощью выражения

$$I_i(x, y) = \cos(\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta_i), \quad (3)$$

где $\varphi_p(x, y) - \varphi_r(x, y)$ — разность фаз для первого и второго состояний объекта, δ_i — произвольные фазовые сдвиги. Для четырёх сдвигов $\delta_i = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ\}$, $i = 0, 1, 2, 3$, получим серию синусоидальных картин, показанных на рис. 4.

Затем с помощью метода пошагового фазового сдвига получим фазовое распределение, которое имеет точки разрыва только в том случае, если результирующее фазовое распределение превышает разность фаз проецируемых полос до и после нагружения объекта. Это значительно снижает требования к алгоритмам устранения фазовой неоднозначности.



Рис. 3. Фазовые распределения изображений объекта при проекции на него 20 полос: до нагрузки (a) и после нагрузки (b)

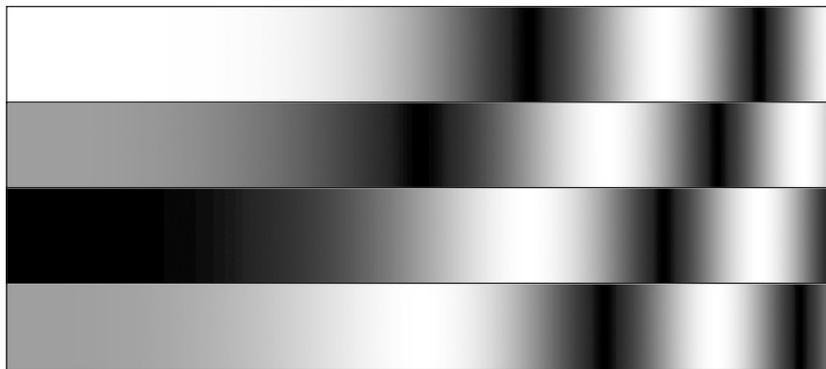


Рис. 4. Серия синусоидальных картин, соответствующих полю деформаций, полученных с помощью выражения (3)

сти. Формулы расшифровки для каждого из состояний объекта имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sin(\varphi) = \sqrt{2}(I_1 - I_5) + (I_2 - I_4 - I_6 + I_8), \\ \cos(\varphi) = \sqrt{2}(-I_3 + I_7) - (I_2 - I_4 + I_6 + I_8). \end{cases} \quad (4)$$

Фазовый сдвиг между картинами $\delta_i - \delta_{i-1}$ составляет 45° . Каждая из приведённых формул представляет собой комбинацию двух формул, имеющих одинаковые по модулю и противоположные по знаку реакции на нелинейность проецируемых на объект полос. Это позволяет на порядок уменьшить погрешность определения фазы по сравнению с известными формулами расшифровки [4] и соответственно повысить чувствительность измерений. Затем по алгоритму (3) рассчитывалось фазовое распределение, пропорциональное полю смещений, которое с точностью до множителя совпадает с теоретическим графиком прогиба балки.

Метод также может применяться и для исследования напряжённо-деформированного состояния объектов методами голографической интерферометрии.

Определение чувствительности метода. На балку размером 430 мм проецируется картина синусоидальных полос. Всего проецируется 3996 точек. На каждую полосу приходится 40 пикселей. Таким образом, получаем всего 97,5 полос. Размер одной полосы составляет 4,098 мм. При определении фазовых значений, которые пропорциональны профилю, на одну полосу приходится 2π рад, что соответствует 4098 мкм. Регистрировалось по 8 картин до и после деформации объекта. Фазовый сдвиг между картинами 90° . Также устранялись геометрические искажения и неравномерность освещения при проекции и регистрации синусоидальных картин [30–32].

Для определения чувствительности метода прикладывалась различная нагрузка к свободному концу балки. Его отклонение фиксировалось микрометром с точностью ± 5 мкм. На рис. 5 показаны графики регистрируемых деформаций при отклонениях свободного конца балки на 0,5, 0,1, 2,0, 3,0 мм соответственно. Видно, что при определении деформации высок уровень шумов. Поэтому здесь и при определении предельной чувствительности выделялись тренды кривых деформаций.

Для исследования нижней границы деформаций были проведены измерения при малых нагрузках. Отклонение свободного конца балки при этом составило 10, 20 и 50 мкм соответственно (рис. 6). Из рисунка следует, что чувствительность метода позволяет проводить измерения при малых нагрузках, однако относительная погрешность измерения остаётся достаточно большой. Это хорошо видно на графике деформации при отклонении свободного конца балки на 10 мкм (рис. 7).

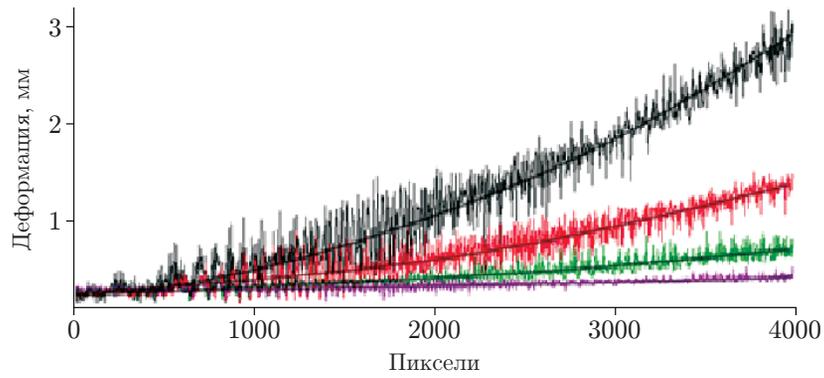


Рис. 5. Графики кривых нормальных деформаций при отклонении свободного конца балки на 0,5, 1,0, 2,0 и 3,0 мм

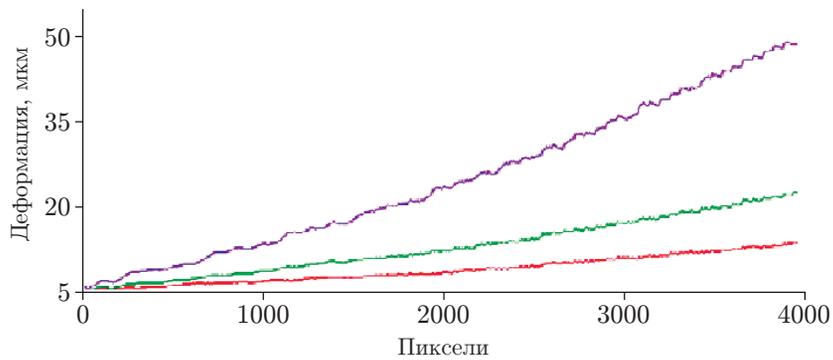


Рис. 6. Графики кривых нормальных деформаций при отклонении свободного конца балки на 10, 20 и 50 мкм

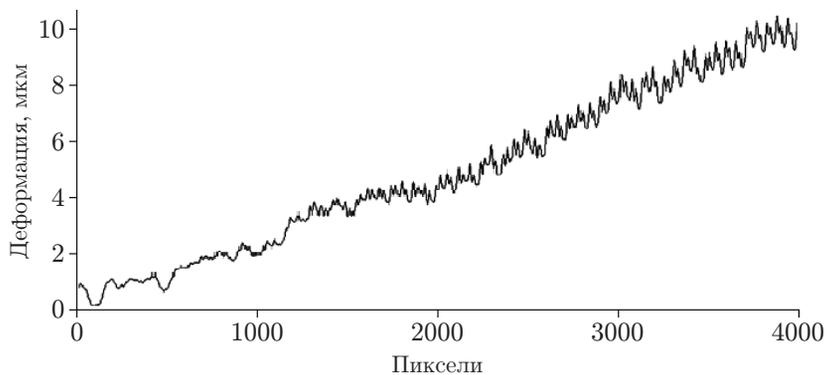


Рис. 7. График кривой нормальных деформаций балки

Таблица 1

Деформация, мкм	Измеренное значение, мкм	Абсолютная погрешность, мкм	Относительная погрешность
10	10,138	$\pm 0,124$	0,0132
20	19,77	$\pm 0,232$	0,0115
50	50,71	$\pm 0,711$	0,0142
500	487,899	$\pm 11,102$	0,0242
1000	1015,442	$\pm 16,447$	0,0154
2000	2025,808	$\pm 25,633$	0,0129
3000	3040,501	$\pm 41,365$	0,0135

В табл. 1 приведены результаты измерений деформаций и рассчитанные по всему сечению средние значения абсолютной и относительной погрешностей.

Заключение. В данной работе рассмотрена возможность определения деформаций больших объектов методом фазового структурированного освещения. Метод основан на проекции серии синусоидальных полос на поверхность исследуемого объекта. Предложен новый метод формирования поля разности фаз с повышенной чувствительностью к перемещениям. Чувствительность метода сопоставима с методами голографической интерферометрии. Экспериментально показано, что предлагаемый метод позволяет определять деформации при смещении свободного конца закреплённой балки длиной 0,5 м на величину менее 10 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Майкельсон А. А.** Исследования по оптике. М.-Л.: Госиздат, 1928. 200 с.
2. **Оптический** производственный контроль /Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
3. **Коломийцов Ю. В.** Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
4. **Гужов В. И., Ильиных С. П.** Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 258 с.
5. **Козачок А. Г.** Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 176 с.
6. **Гужов В. И., Козачок А. Г., Жилкин В. А., Герасимов С. И.** Автоматизация обработки оптической информации, получаемой с использованием голографических накладных интерферометров // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по голографии. Рига, 12–14 ноября, 1985. С. 321–322.
7. **Stetson K. A.** A brief history of holographic interferometry // Proc. of Frontiers in Optics, OSA Technical Digest, Optical Society of America. 2006. P. 50–55.
8. **Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.** Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 340 с.
9. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия. М.: Мир. 1982. 503 с.
10. **Гужов В. И.** Компьютерная голография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 270 с.
11. **Дюрелли А., Паркс В.** Анализ деформаций с использованием муара. М.: Мир, 1974. 359 с.
12. **Гужов В. И.** Методы измерения 3D профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 82 с.
13. **Hartmann J.** Bemerkungen über den Bau und die Justirung von Spektrographen // Zeitschrift für Instrumentenkunde. Berlin: Julius Springer, 1900. P. 47–58.
14. **Zhang S.** High-resolution, real-time 3-D shape measurement // Abstract of the Dissertation. Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Stony Brook University, 2005. P. 127.

15. **Малючек Т., Федерова И.** Применение фотограмметрических измерительных систем V-STARS в промышленности // САПР и Графика. 2014. № 10. С. 98–101.
16. **Salvi J., Batlle J., Mouaddib E.** A robust-coded pattern projection for dynamic 3d scene measurement // Patt. Recogn. Lett. 1998. **19**. P. 1055–1065.
17. **Caspi D., Kiryati N., Shamir J.** Range imaging with adaptive color structured light // Patt. Anal. Mach. Intell. 1998. **20**, N 5. P. 470–480.
18. **Zhang L., Curless B., Seitz S. M.** Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming // Proc. of the Intern. Symp. on 3D Data Processing Visualization and Transmission. Padova, Italy, June 19–21, 2002. P. 24–26.
19. **Гужов В. И.** Методы измерения 3D профиля объектов. Фазовые методы: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 83 с.
20. **Wyant J. C.** Interferometric optical metrology: Basic principles and new systems // Laser Focus. 1982. **18**. P. 65–71.
21. **Hariharan P., Oreb B. F., Brown N.** Digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry // Opt. Commun. 1982. **41**, N 6. P. 393–398.
22. **Wyant J. C., Creath K.** Recent advances in interferometric optical testing // Laser Focus. 1985. **21**, N 11. P. 118–132.
23. **Carré P.** Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures // Metrologia. 1966. **2**, N 1. P. 13–23.
24. **Bruning J. H., Herriot D. R., Gallagher J. E. et al.** Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses // Appl. Opt. 1974. **13**, N 11. P. 2693–2703.
25. **Cheng Y.-Y., Wyant J. C.** Two-wavelength phase shifting interferometry // Appl. Opt. 1984. **23**. P. 4539–4543.
26. **Suriyasirikun S., Khlayboonme S. T., Thowladda W.** Phase-shifting interferometry for surface roughness measurement on glass substrate Adv. Mater. Research. 2014. **979**. P. 463–466.
27. **Guzhov V., Pinykh S., Kuznetsov R., Haydukov D.** Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry // Opt. Eng. 2013. **52**, N 3. 030501.
28. **Ильиных С. П., Гужов В. И.** Обобщённый алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Автометрия. 2002. № 3. С. 123–126.
29. **Гужов В. И., Поздняков Г. А., Серебрякова Е. Е.** Получение разности фазовых полей при использовании метода пошагового фазового сдвига // Науч. вестн. Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 1 (74). С. 157–166.
30. **Гужов В. И., Марченко И. О., Хайдуков Д. С., Серебрякова Е. Е.** Автоматическая калибровка нелинейности интенсивности в проекционных системах // Инженерный вестн. Дона. 2019. № 4. С. 4.
31. **Гужов В. И., Ильиных С. П., Сажин И. А. и др.** Квазигетеродинный метод интерференционных измерений // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 80–86.
32. **Гужов В. И., Солодкин Ю. Н.** Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм // Оптика и спектроскопия. 1988. **65**, № 6. С. 1123–1128.

Поступила в редакцию 22.04.2020

После доработки 19.06.2020

Принята к публикации 29.06.2020