

ТЕХНИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

© 2006 г. В. Х. Сайнов*, доктор физ. наук; Ж. И. Харизанова*; Е. В. Стойкова*, Ph. D.;
X. М. Озактас**, Ph. D.; Л. Онурал**, Ph. D.

* Центральная лаборатория оптической записи и обработки информации, София, Болгария

** Билкент университет, Анкара, Турция

E-mail: vsainov@optics.bas.bg

Описан метод проекции интерференционных полос как одна из наиболее доступных техник измерения координат объектов и сцен, которую можно применить при решении обратных задач в динамическом голографическом дисплее, где измерение координат необходимо для вычисления дифракционных структур при восстановлении объемных изображений. Представлен сравнительный анализ экспериментальных результатов, полученных при последовательных проекциях интерференционных картин с двумя разными периодами с использованием интерферометра Маха–Цендера в когерентном свете и микрозеркального проектора с цифровой генерацией полос в белом свете. Применение метода ограничено размерами объектов и сцен. Обсуждены возможности применения более усовершенствованных методов, в том числе и голографический подход к восстановлению фазы.

Коды OCIS: 090.2900.

Поступила в редакцию 27.12.2005.

Восстановление фазы для измерения абсолютных координат

Точная информация о координатах объектов и трехмерных сцен необходима для реализации динамического голографического дисплея. Основным требованием в этом случае является проведение измерений случайного распределения объектов в сцене в реальном времени. Наиболее перспективны для решения этой задачи методы оптической профилометрии. Некоторые из существующих и имеющих в продаже оптических систем для измерения координат реальных объектов разработаны на основе лазерного сканирования и триангуляции [1, 2]. Ввиду того что сканирование поверхности осуществляется в одном направлении “точка за точкой” при ограниченной скорости считывания информации, состояние окружающей среды (вибрации, турбулентность воздуха и т. д.) оказывает сильное влияние на точность измерения, особенно в случае крупномасштабных сцен в реальных условиях. Специальное внимание следует уделить широкому классу методов восстановления фазы на основе муаровой и проекционной интерферометрии [3, 4]. Основное преимущество указанных способов заключается в простоте выполнения, высокой точности и скорости измерения.

Информацию о поверхности объекта можно получить посредством восстановления фазы объектного волнового фронта, регистрируя интенсивности в пространственной и частотной областях. Мультиплицирование по пространственным частотам в

профилометрии, основанной на преобразовании Фурье, в сочетании с усложненным алгоритмом восстановления фазы обеспечивает измерение в “реальном времени” посредством однократной записи, что очень существенно при измерении движущихся изолированных в пространстве объектов [5]. Недостатком этого метода является сравнительно невысокая точность измерения, что ограничивает его широкое практическое применение. С этой точки зрения более подходящей для измерения и восстановления трехмерных сцен является техника проекции интерференционных полос с введением фазового сдвига [4]. Этот упрощенный подход широко применяется в оптической метрологии для измерения поверхностей и неразрушающего контроля [6–9]. Проекцию полос можно осуществить когерентным светом, пользуясь, например, интерферометром Майкельсона, или в некогерентном свете с помощью двухкоординатных пространственных модуляторов света, таких как жидкокристаллические или микрозеркальные проекторы. Запись деформированных поверхностью объекта полос для заданного фазового сдвига ϕ обеспечивает возможность восстановления фазы $\Delta\phi$, модулированной объектом, из интерферограммы:

$$I(x, y) = \bar{I}(x, y) \{1 + \eta(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y) + \phi]\}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ – интенсивность в точке (x, y) , $\bar{I}(x, y)$ – усредненное значение интенсивности, η – контраст интерференционных полос. Для этой цели необходимы, по крайней мере, три независимых измерения для определения трех неизвестных параметров

в уравнении (1). Разработаны разнообразные фазово-сдвиговые алгоритмы [4, 10, 11]. Популярный пятишаговый алгоритм основан на пяти независимых измерениях интенсивности I_i , соответствующих пяти фазовым сдвигам $\phi_i = (i - 3)\pi/2$, где $i = 1-5$, в результате чего ошибка калибрования уменьшается:

$$\Delta\varphi = \text{tg}^{-1}[2(I_2 - I_4)/(2I_3 - I_5 - I_1)]. \quad (2)$$

Освещающая система оказывает существенное влияние на качество измерений. Преимуществами интерферометрически генерированных полос являются повышенная эффективность освещения, высокий и неограниченный по глубине сцены контраст полос и более гибкое формирование полос. Полосы обладают чистым синусоидальным профилем, что обеспечивает высокую точность измерений. Влияние внешней засветки в рабочих условиях можно устранить соответствующим интерференционным фильтром. Жидкокристаллические проекторы с некогерентным светом и цифровой генерацией полос разной частоты характеризуются высоким быстродействием, но ограничены по разрешению. Плазменные и микрозеркальные устройства создают более высокую яркость освещения. Наилучший контраст присущ микрозеркальным модуляторам, что наряду с высокой оптической эффективностью делает их более перспективными для практического применения. Несинусоидальность профиля полос из-за ограниченного числа и размера пикселей оказывается основным недостатком указанных проекционных систем. К тому же расфокусировка в областях рельефа большой глубины приводит к уменьшению контраста полос и точности измерений.

Как следует из формулы (2), значения разности фаз определяются не однозначно, а с точностью 2π , что требует сшивания значений фазы в точках разрыва, обусловленных тангенциальной зависимостью. Для корректного сшивания следует ввести оценку качества фазовых данных с целью выделения точек и зон разрывов, присущих самому объекту или обусловленных присутствием шума, вибраций, затенения и т. д. Хорошие оценки качества отдельных пикселей в фазовой картине можно получить на основе дисперсии частных производных фазы по пространственным координатам x и y или максимального значения фазового градиента, а также путем их комбинации [11]. Максимальный фазовый градиент определяют таким образом, чтобы он превышал максимальное значение частных производных фазы для каждого пикселя, где оценка максимальных значений проводится усреднением в рамках окна $k \times k$ для каждого пикселя. В настоящей работе сшивание фазы проводится по методу, основанному на прослеживании фазовой траекто-

рии, при котором в случае отсутствия точек разрывов фазу можно интегрировать вдоль любой траектории.

Измерение трехмерных координат по методу проекции двухпериодных интерференционных картин

Эффективное измерение трехмерных координат можно осуществить посредством проекции двухпериодных интерференционных картин [12-14]. Этот подход можно дополнительно усовершенствовать путем двойного симметричного освещения или двойной симметричной регистрации для уменьшения влияния затенения.

На рис. 1 представлены схемы реализации метода проекции световых полос с помощью интерферометра Маха-Цендера (рис. 1а) и микрозеркального проектора (рис. 1б) с цифровым синтезом полос. Метод основан на генерации в плоскости $(x', y', 0)$ интерференционных полос с периодами d_1 и d_2 , которые параллельны оси Y' . Оси Y и Y' перпендикулярны к плоскости чертежа. Фаза проектируемых полос определяется как $\varphi'_i = 2\pi x'/d_i$, $i = 1, 2$. Восстановление фазы осуществляется в координатной системе XYZ , причем ось Z ориентирована параллельно оптической оси регистрирующей твердотельной камеры (ПЗС). Угол α является углом наклона оси освещения Z' по отношению к оси наблюдения Z . Фаза $\Delta\varphi_i(x, y)$ в распределении интенсивности (1) определяется с помощью пятишагового алгоритма (2) для каждой картины полос, соответствующей данному периоду. Меньший период выбран с учетом обеспечения 10 пикселей на период, что в сущности превышает теоретическое требование для точного измерения фазы. В системе координат XYZ фазу $\Delta\varphi_i(x, y)$ можно представить как

$$\Delta\varphi_i(x, y) = \varphi_i(x, y) - \varphi_0 = \{2\pi[lx \cos \alpha + lz(x, y) \sin \alpha] / d_i [l - z(x, y) \cos \alpha + x \sin \alpha]\} - \varphi_0, \quad (3)$$

где $i = 1, 2$; $z(x, y)$ – рельеф объекта в точке (x, y) , l – расстояние от объекта до выходного зрачка объектива освещения и φ_0 – неизвестная калибрационная постоянная. Вычитая фазовые распределения $\Delta\varphi_i(x, y)$ и полагая

$$[\varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y)] / 2\pi \equiv N_{xy}, \quad (4)$$

где N_{xy} – числа, полученные на основе измеренных значений фаз, выражение для координаты z получаем в виде

$$z(x, y) = \left[N_{xy} (l + x \sin \alpha) + \frac{d_2 - d_1}{d_1 d_2} lx \cos \alpha \right] / \left[N_{xy} \cos \alpha - \frac{d_2 - d_1}{d_1 d_2} l \sin \alpha \right]. \quad (5)$$

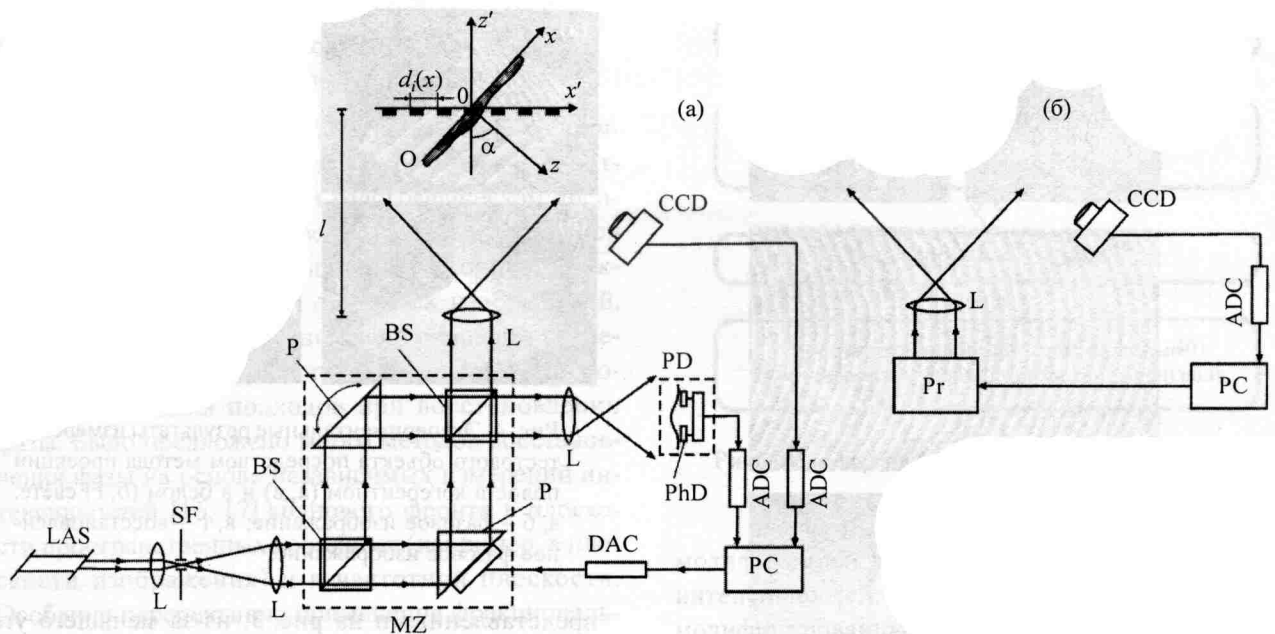


Рис. 1. Экспериментальные установки для проекции полос в когерентном (а) и белом (б) свете. LAS – лазер, O – объект, L – линза, BS – расщепитель пучка, SF – пространственный фильтр, P – призма, MZ – интерферометр Маха–Цендера, PD – фотодетектор, PhD – фотодиоды, PC – компьютер, ADC – аналого-цифровой преобразователь, CCD – ПЗС-камера, Pr – микрозеркальный проектор, DAC – цифроаналоговый преобразователь.

Чувствительность метода в основном зависит от точности измерения разности фаз, т. е. от точности определения N_{xy} . Влиянием неточности определения l и α можно пренебречь.

На основе уравнения (5) чувствительность метода, определяемую минимально измеряемой разностью z -координат, можно представить как

$$\delta z = [d_1 d_2 (d_1 - d_2) l (x + l \sin \alpha) \delta N_{xy}] / [(d_1 d_2 N_{xy} \cos \alpha + (d_1 - d_2) l \sin \alpha)^2]. \quad (6)$$

Точность измерения возрастает с увеличением разности периодов полос $d_1 - d_2$ и угла освещения α , но неодинакова на протяжении объекта и уменьшается при увеличении его поперечного размера. На рис. 2 представлена неопределенность измерений $|\delta z|$ для набора углов освещения α в зависимости от периода d_2 при фиксированных значениях $d_1 = 0,5$ мм, $\delta N_{xy} = 0,02$, $N_{xy} = 1,5$.

Результаты измерения поверхности посредством проекции двухпериодных интерференционных полос (рис. 1а) при $\alpha = 70^\circ$, $l = 1500$ мм, $d_1 = 0,5$ мм и $d_2 = 2$ мм представлены на рис. 3. Объектом измерения был цилиндрический сосуд из композитного материала с наружным диаметром 200 мм под давлением 500 кПа. Измерялась деформация части боковой стенки цилиндра размером 100×100 мм. Рисунок 3а содержит фрагменты двухпериодных полос, модулированных поверхностью объекта. Восстановленная разность фаз в шкале интенсивности белого света по модулю 2π приведена на

рис. 3б. Соответствующие “сшитое” изображение фазовой разности и трехмерное изображение представлены на рис. 3в и 3г. Чувствительность метода позволяет регистрировать неоднородное деформирование поверхности объекта при давлении.

Сравнительные эксперименты применения двухпериодной проекционной интерферометрии с генерацией полос с помощью интерферометра Маха–Цендера (рис. 1а) и микрозеркального проектора с цифровым синтезом (рис. 1б) проведены для одного и того же объекта – кубика с размерами $30 \times 30 \times 30$ мм [15]. В обоих экспериментах пери-

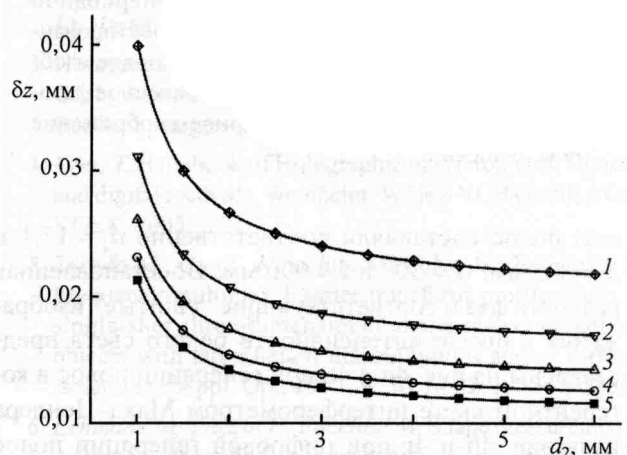


Рис. 2. Неопределенность измерения $|\delta z|$ в зависимости от периода d_2 . $\alpha = 30^\circ$ (1), 40° (2), 50° (3), 60° (4), 70° (5). $d_1 = 0,5$ мм, $x = 0$, $\delta N = 0,02$, $l = 2000$ мм, $N = 1,5$.

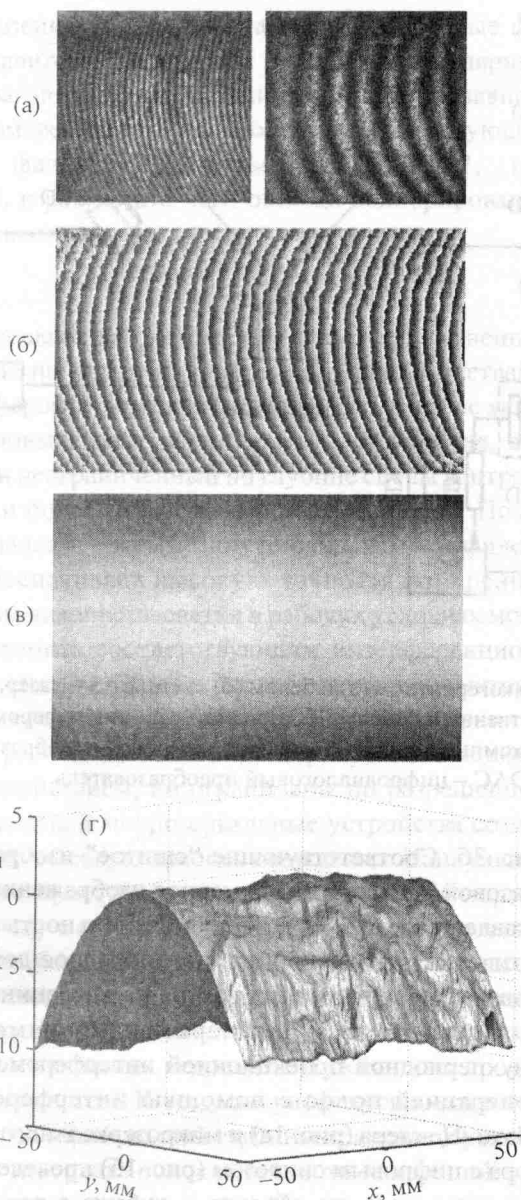


Рис. 3. Измерение абсолютных координат центральной части сосуда из композитного материала с применением проекционной двухпериодной интерферометрии. а – фрагменты проектированных полос с периодами d_1 и d_2 ; б – фазовое изображение по модулю 2π ; в – восстановленное фазовое изображение; г – трехмерное изображение поверхности.

оды полос составляли соответственно $d_1 = 17,1$ и $d_2 = 8,5$ мм, $\alpha = 30^\circ$ и $l = 900$ мм. Восстановленная разность фаз и соответствующие “сшитые” изображения в шкале интенсивности белого света представлены на рис. 4а и 4в при генерации полос в когерентном свете интерферометром Маха–Цендера и на рис. 4б и 4г при цифровой генерации полос посредством микрозеркального проектора в белом свете. Следует отметить, что чувствительность и точность измерения в данных экспериментах существенно ухудшаются по сравнению с результатами,

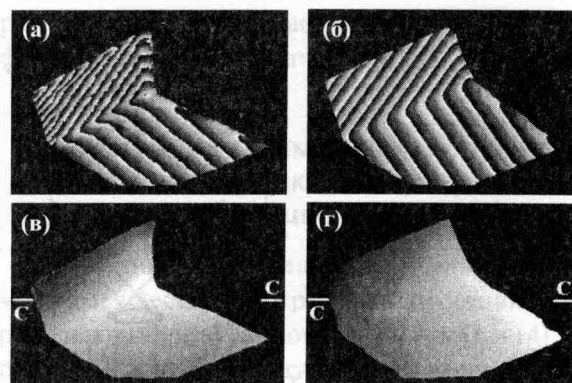


Рис. 4. Экспериментальные результаты измерения тестового объекта посредством метода проекции полос в когерентном (а, в) и в белом (б, г) свете. а, б – фазовое изображение; в, г – восстановленное фазовое изображение.

представленными на рис. 3, из-за меньшего угла освещения α и невозможности оптимального выбора периодов интерференционных полос. Это связано с ограниченным разрешением и небольшими размерами модулятора микрозеркального проектора (800×600 пикселей) для создания полос синусоидального профиля. Сравнение полученных результатов представлено на рис. 5 для точек сечения вдоль линии С–С, указанной на рис. 4в и 4г. Как и следовало ожидать, точность измерения профиля по методу интерферометрически генерированных полос несколько выше, но простота и удобство метода проекции полос в белом свете более существенны при решении ряда практических задач. Для проведения измерений в реальном времени по методу проекции полос необходимо осуществить одновременное освещение объекта сдвинутыми по фазе полосами, которые генерируются на разных длинах волн, используя интерференционные светоделители при регистрации.

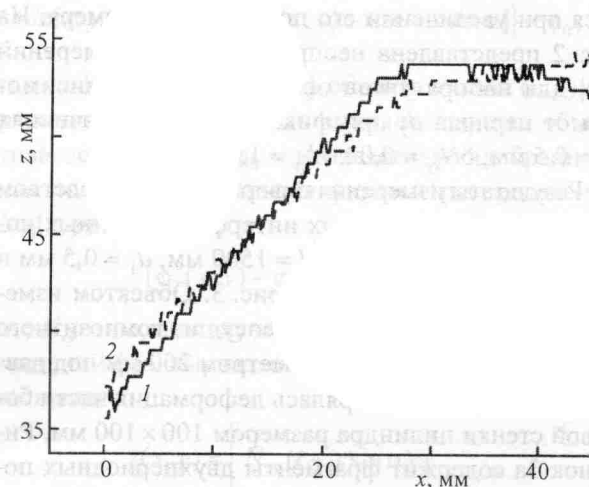


Рис. 5. Сравнение сечений, указанных линией С–С на рис. 4в и 4г. 1 – метод интерферометрически генерированных полос, 2 – метод проекции полос.

Голографический подход к восстановлению фазы

Представленный метод проекции интерференционных полос можно применить при решении обратных задач в динамическом голографическом дисплее, так как измерение координат объектов и сцен необходимо для вычисления дифракционных структур при восстановлении объемных изображений. Применение метода ограничено в основном размерами объектов и сцен, что требует дальнейшего усовершенствования подходов при восстановлении фазы. Было предложено много методов восстановления фазы на основе независимых измерений интенсивностей [16, 17] волнового фронта в плоскости пространственных координат (например, в плоскости изображения) и в частотной плоскости. Особенно перспективно применение фракционального преобразования Фурье, как и обобщение этого подхода на случай многократных фракциональных преобразований Фурье. Исследовано также восстановление фазы только на основе преобразования Фурье с добавочными ограничениями в отношении размеров, неотрицательности и т. д. В меньшей степени исследованы возможности применения многократных измерений интенсивности при заданной кодировке (модулировании) входного сигнала. Для этой цели можно ввести дополнительно или использовать вводимые объектом вариации входного сигнала. В самом деле, большинство методов восстановления фазы основываются на измерениях интенсивности при двух независимых представлениях сигнала для составления независимых уравнений, которые решаются итеративно и обычно требуют дополнительного анализа.

В принципе, при всех методах восстановления фазы проводится такое измерение интенсивности света, при котором возможно получить информацию об амплитуде и фазе волнового фронта, что свойственно голографии. Однако на очевидную связь голографии с методами восстановления фазы стали указывать сравнительно недавно. Практически за полное описание или “голограмму” сигнала можно принять произвольный набор сигналов, полученный путем заданного алгоритма восстановления фазы из измеренных интенсивностей с введением добавочных ограничений. Самым общим описанием сигнала является интенсивность трансформированного или модифицированного каким-то способом изображения. Таким образом, зарегистрированная интенсивность и ее фурье-представление или любое из фракциональных фурье-представлений, вместе взятые, составляют голограмму сигнала. Другие наборы данных можно составить модулированием, маскированием или другой подходящей



Рис. 6. Схема решения задачи измерения координат.

модификацией входного сигнала до регистрации интенсивностей. Интенсивности, созданные этим модифицированным входным сигналом, позволят впоследствии восстановить фазу, и в этом смысле составляют голограмму сигнала. На основе этих рассуждений решение задачи измерения координат можно свести к составлению набора модифицированных изображений, как схематически представлено на рис. 6. В принципе, существует множество видов модификации, включая сдвиг, наклон, модулирование, маскирование и параметрические трансформации сигнала, для осуществления независимых измерений интенсивностей и восстановления фазы.

Настоящая работа выполнена по контракту 511568 “3DTV” в рамках FP6-ЕС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen F., Brown G.M., Song M.* Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods // *Opt. Engin.* 2000. V. 39. № 1. P. 10–22.
2. *Blais F.* Review of 20 years of range sensor development // *J.E. Imag.* 2004. V. 13. № 1. P. 231–243.
3. *Holographic Interferometry Principles and Methods / Ed. by Rastogi P.K.* // *Springer Series in Optical Sciences.* Berlin: Springer-Verlag, 1994. V. 68.
4. *Kreis T.* Handbook of Holographic interferometry: Optical and digital methods. Weinheim: Willey-VCH GmbH&Co. KGaA, 2005.
5. *Takeda M., Gu Q., Kinoshita M., Takai H., Takahashi Y.* Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 22. P. 5347–5354.
6. *Lehmann M., Jacqot P., Facchini M.* Shape measurements on large surfaces by fringe projection // *Exp. Techn.* 1999. V. 23. № 2. P. 31–35.
7. *Sitnik R., Kujavinska M., Woznicki J.* Digital fringe projection system for large-volume 360 deg shape measurement // *Opt. Engin.* 2002. V. 41. № 2. P. 443–449.

8. *Körner K., Windecker R., Fleischer M., Tiziani H.J.* One-grating projection for absolute three-dimensional profiling // *Opt. Engin.* 2001. V. 40. № 8. P. 1653–1660.
9. *Vincent C., Fournel T., Fouquet R.* Self-indexing of multiview fringe system // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. № 11. P. 1981–1986.
10. *Liu H., Lu G., Wu S., Yin Sh., Yu F.* Speckle-induced phase error in laser-based phase-shifting projected fringe interferometry // *JOSA. A.* 1999. V. 16. № 6. P. 1484–1494.
11. *Ghiglia D.C., Pritt M.D.* Two-dimensional phase unwrapping. N.Y.: J. Wiley&Sons, 1998.
12. *Sainov V., Harizanova J., Stoilov G., Boone P.* Relative and absolute coordinates measurement by phase-stepping laser interferometry // *Optics and Lasers in Biomedicine and Culture.* Springer, 2000. V. 5. P. 50–53.
13. *Sainov V., Harizanova J., Shulev A.* Two-wavelength and two-spacing projection interferometry for real objects contouring // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5226. P. 184–188.
14. *Harizanova J., Sainov V.* Two-spacing projection phase stepping interferometry for 3D-surface measurements of large scale objects // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5478. P. 253–260.
15. *Harizanova J., Kolev A.* Comparative study of fringes generation in two-spacing phase-shifting profilometry // *Proc. SPIE.* 2005 (accepted for publication).
16. *Ertosun M., Atli H., Ozaktas H.M., Barshan B.* Complex signal recovery from multiple fractional Fourier-transform intensities // *Appl. Opt.* 2005. V. 44. № 23. P. 4902–4908.
17. *Ertosun M., Atli H., Ozaktas H.M., Barshan B.* Complex signal recovery from two fractional Fourier-transform intensities: order and noise dependence // *Opt. Commun.* 2005. V. 244. P. 61–70.

Том 73

Номер 7

Июль 2006

ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Выходит на русском и английском языках



JOURNAL
OF
OPTICAL TECHNOLOGY

Volume 73

Number 7

July 2006