

Экспериментальная погрешность меньше расчётной погрешности метода, что объясняется проведённой перед экспериментами юстировкой рабочих весов KD-600 HR. Юстировка была сделана сознательно, поскольку в практике ГКЦ принято перед заправкой производить контрольное погружение весов, при необходимости — юстировку, и затем — калибровку, которую проводит метрологическая служба космодрома.

При испытаниях каждую дозу 1000 кг выдавали за 13 порций. В системе заправки на космодроме КУРУ в качестве заправочной ёмкости используется ТЗК V = 250 л, возможно это позволит выдавать каждую дозу горючего (или окислителя) за 8 порций и уменьшить погрешность выдачи дозы.

Заключение. Система заправки в ГКЦ, реализующая разработанный метод многопорционного весового дозирования, обеспечивает заправку баков РБ «Фрегат» с погрешностью, не превышающей 0,04 и 0,08 % выдаваемой дозы для окислителя и горючего, соответственно. Юстировка весов

перед заправкой может позволить дополнительно уменьшить погрешность заправки. В период 2009—2015 гг. в ГКЦ было проведено 11 успешных заправочных кампаний.

Л и т е р а т у р а

1. Бантыш И. В., Денисов О. Е., Дмитриев Ю. А., Лебедев А. Г., Назаров В. М., Шульга В. М. Компарирование как метод заправки космических аппаратов малыми дозами компонентов топлива // Приборы. 2015. № 1. С. 20—25.

2. Устройства весоизмерительные с функцией дозирования УВФД. Сертификат об утверждении типа RU.C.28004.A № 18146, зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 27296-04.

3. ГОСТ Р 8.563—2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.

Дата принятия: 01.03.2017.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.373.826

Калибровка матричных фотоприёмников и прецизионное позиционирование объектов по растровым изображениям

Г. Г. ЛЕВИН¹, В. Л. МИНАЕВ¹, Я. А. ИЛЮШИН^{2, 3}, В. Г. ОШЛАКОВ⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: minaev@vniiofi.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

⁴ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Рассмотрена задача определения малого перемещения объекта по серии изображений в интерференционном микроскопе. Оценена степень влияния фазовых шумов восстановления когерентной структуры поля. Исследовано влияние неоднородности индивидуальных пикселей матричного фотоприёмника растрового изображения.

Ключевые слова: сверхразрешение, субпиксельное разрешение, матричный фотоприёмник, микроскоп, растр.

The problem of determination of small displacement of the object on the series of microscopic interferometric images is considered. Degradation of coherent image restoration from phase noise is estimated. Impact of the calibration errors of individual pixels of image registering matrix is investigated.

Key words: super-resolution, sub-pixel resolution, photodetector array, microscope, raster image.

Задача прецизионного позиционирования объекта по растровому изображению актуальна для целого ряда приложений, например при производстве и контроле различных изделий микроэлектронной промышленности [1], обработке изображений ориентиров и источников света в системах ориентирования и навигации летательных аппаратов, судов и других транспортных средств [2, 3], обработке дискретизированной информации любого типа (сигналов, временных рядов и т. д.), в фотограмметрии [4]. В ряде случаев не-

обходимо достижение позиционирования с субпиксельным разрешением — определение расположения отдельных элементов и структур растровых изображений, а также взаимного позиционирования нескольких изображений с погрешностью не более размера единицы раstra изображения (пиксела). Для решения таких задач разработано множество разнообразных алгоритмов субпиксельного позиционирования [5].

Алгоритмы позиционирования растровых изображений с субпиксельным разрешением. При построении алгоритмов регистрации, как правило, ограничивают класс допустимых движений объекта, среди которых ведётся поиск решения. Процедура поиска сводится к нахождению конкретного элемента в пределах заданного класса движений с целью оптимизации критерия поиска. Классы движений обычно включают смещения и деформации без искажений формы (трансляции, повороты [6] и масштабирования), а также нелинейные деформации. Критерии оптимизации построены по принципу поиска минимума разности между изображениями в той или иной метрике и максимумов нормированного коэффициента корреляции и взаимной информативности совместного распределения пикселей обоих изображений.

На практике широко применяют алгоритмы для пространства изображений (пикселей) [7, 8] и Фурье-пространства [6, 9]. Фурье-алгоритмы более приспособлены для обработки изображений, содержащих резкие границы, и пространственный спектр которых богат высокочастотными составляющими [10]. Для изображений с плавными вариациями яркости и быстро спадающим на высоких частотах пространственным спектром лучше использовать алгоритмы, работающие непосредственно в пространстве изображений.

Теоретические и практические оценки точности алгоритмов субпиксельного разрешения оказываются весьма различными. При этом принято, что все значения исследуемого сигнала (пиксели изображения, отсчёты аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и т. д.) характеризуются полностью идентичными параметрами. В некоторых случаях (при последовательной оцифровке сигнала во времени с помощью АЦП) такое предположение оправдано. Однако, например, для матричных приёмников растровых изображений существуют различия параметров индивидуальных пикселей. Принятая в фототехнике оценка чувствительности всех пикселей матричного фотоприёмника по единому среднему уровню равномерной засветки не исключает отклонений центров чувствительности пикселей от заданных позиций и различия их физических размеров. Мотивацией к предлагаемому исследованию явилась необходимость оценки влияния указанных факторов на возможность прецизионных измерений матричными фотоприёмниками изображения.

Моделирование субпиксельного позиционирования растровых изображений оптической микроскопии. Для применения техники субпиксельного разрешения к данным оптической микроскопии реальных объектов [11–13] (в частности, изделий микроэлектронной промышленности) требуется учитывать специфические особенности, ограничивающие возможность использования методов субпиксельного разрешения. Так, характерный для современных микроскопов размер поля зрения составляет десятки длин волн используемого диапазона излучения, а период дискретизации регистрируемого изображения — малую долю длины волны (0,10–0,01) λ , т. е. значительно превышает рэлеевский дифракционный предел оптического разрешения прибора. Таким образом, регистрируемое матричным фотоприёмником изображение объекта является в определённом смысле избыточным, в нём практически отсутствуют резкие границы. Кроме того, нанесение каких-либо специальных графических текстур на поверхность исследуемого объекта [1, 14] может оказаться невозможным по технологическим соображениям. Указанные причины жёстко ограничивают класс методов субпиксельного разрешения, применимых в данной

ситуации. Наиболее целесообразной для диагностики малых смещений объектов является обработка наблюдаемых в микроскоп оптических спеклов непосредственно в пространстве регистрируемого изображения.

Важный фактор, определяющий возможности реализации предлагаемых подходов, — уровень шума входных данных алгоритмов. В настоящее время в современных автоматизированных интерферометрических микроскопах достигнута погрешность измерения фазы на уровне тысячных долей периода. Результаты измерений содержат погрешности различной природы, в том числе из-за округления измеряемой величины в АЦП, и распределение суммарных ошибок отлично от нормального (гауссового). Однако для грубых оценок можно считать распределение погрешности гауссовым, поскольку для восстановления когерентной структуры поля по наблюдаемым интерференционным картинкам в присутствии опорной волны применяются специальные многофазные алгоритмы [15] и в конечном результате суммируются данные многих независимых регистраций поля.

Авторы [12, 13] разработали прецизионный алгоритм определения субпиксельного смещения объекта, провели комплекс лабораторных экспериментов и смоделировали влияние различных факторов на погрешность результатов измерений. Рассмотрим модель элемента структуры фазового микроскопического объекта в виде ступенчатого профиля плоской поверхности:

$$z(x) = \begin{cases} H/2, & x > 0; \\ -H/2, & x < 0, \end{cases}$$

где H — половина высоты ступеньки профиля.

Комплексная амплитуда отражённой от поверхности такого объекта волны в приближении Кирхгофа выражается как

$$A(x) = \begin{cases} \exp(-ikH), & x > 0; \\ \exp(+ikH), & x < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где k — волновое число.

После пространственного Фурье-преобразования амплитуды (1) по координате x получим уменьшение пространственного спектра амплитуды с ростом поперечного волнового числа k_x как k_x^{-1} . Ограничим ширину спектра уровнем физической разрешающей способности прибора $|k_x| \leq K_x$ и найдём обратным Фурье-преобразованием комплексную амплитуду изображения, регистрируемого интерференционным микроскопом. Интегрирование пространственного спектра k_x^{-1} в конечных пределах приведёт к функции интегрального синуса [16]:

$$\int_{-K_x}^{K_x} \sin(k_x x) dk_x / k_x = \int_{-K_x}^{K_x} \exp(ik_x x) dk_x / k_x = \text{Si}(K_x x).$$

Таким образом, в рассматриваемом приближении комплексная амплитуда изображения ступенчатого профиля в оптическом микроскопе будет иметь вид

$$\tilde{A}(x) = \cos(kH) + 2i \sin(kH) \text{Si}(K_x x) / \pi. \quad (2)$$

Максимальное поперечное волновое число K_x , передаваемое регистрируемым изображением, обусловлено числовой апертурой микроскопа. В данной работе для приближённых оценок оно везде принято равным волновому числу используемого излучения: $K_x = k$. Профиль поверхности объекта, восстановленный по фазе изображения (рис. 1), при не очень большой высоте ступени [17]:

$$h(x) \approx -\lambda \arg(\tilde{A}(x)) / (4\pi) \approx 2H \text{Si}(K_x x) / \pi. \quad (3)$$

Итак, входные данные — пара восстановленных профилей поверхности $h_1(x)$, $h_2(x)$, приближенно (если пренебречь погрешностями измерений) определяемых формулой (3) и сдвинутых друг относительно друга на малую величину d :

$$h_1(x) \approx h_2(x + d).$$

Погрешность восстановления высоты профиля зависит в основном от погрешности измерения фазы волны интерференционным микроскопом и для ступеньки высотой порядка $\lambda/4$ может составлять десятые доли процента. По результатам измерений можно определить взаимную корреляционную функцию этих погрешностей

$$F(i) = \sum_j h_1(x_j) h_2(x_{i+j}) \approx \int h(x) h(x + d + iD) dx \quad (4)$$

на сетке отсчетов x_j , определяемой номинальной разрешающей способностью матричного фотоприёмника микроскопа, т. е. размером D её пиксела в масштабе регистрируемого изображения. В результате взаимного смещения двух изображений на неизвестную величину d , составляющую не более размера пиксела, симметрия взаимной корреляционной функции $F(i)$ оказывается нарушенной. При этом $F(i)$ представляет автокорреляционную функцию изображения (2), смещённую относительно начала координат на d . Согласно оценке (4) это смещение может быть найдено с высокой точностью. Так как искомое смещение $d \leq D$, максимум взаимной корреляционной функции $F(0)$ соответствует нулевому значению i . После аппроксимации корреляционной функции в окрестности максимума многочленом второй степени $ax^2 + bx + c$ методом линейной регрессии несложно определить коэффициенты этого многочлена. Затем можно оценить расположение максимума (вершины параболы) по формуле $x = -b/2a$, соответствующее искомому смещению двух анализируемых изображений.

Применение простейшей оценки смещения на основе локальной параболической аппроксимации корреляционной функции по трём отсчётам описано в [5]:

$$\Delta^{(3)} = [F(-1) - F(1)] / [2(F(1) - 2(F(0) + F(1)))]. \quad (5)$$

В [12] изучены также другие оценки смещения и показано, что (5) оказывается наилучшей в смысле устойчивости к шумам и другим погрешностям измерений. По этой причине при дальнейших исследованиях использовали (5).

По (2) найдём пару микроскопических изображений объекта, сдвинутых друг относительно друга на малую величину d , с некоторым шагом дискретизации. Профиль поверхности определим по формуле [17]:

$$h(x) = -\lambda \varphi / (4\pi),$$

где φ — фаза комплексной амплитуды изображения.

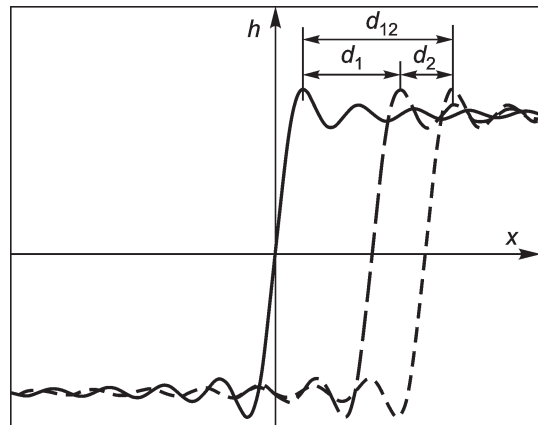


Рис. 1. Идеализированное фазовое изображение ступенчатого профиля в оптическом микроскопе-интерферометре

К вычисленным таким образом высотам профиля поверхности добавим аддитивные случайные шумы. Шумы измерений распределены по нормальному закону и независимы как между отдельными пикселями каждого изображения, так и между пикселями обоих изображений [12]. Далее по (4) рассчитаем взаимную корреляционную функцию двух изображений $F(i)$ и по формулам типа (5) оценки Δ смещения объекта d по нескольким значениям корреляционной функции.

Результаты численного моделирования оценки смещения по формуле (5) приведены на рис. 2. Даже при относительно большом фазовом шуме измерения (1 % полной высоты профиля) погрешность измерения смещения составляет менее нескольких сотых долей пиксела. Современные интерференционные микроскопы обеспечивают погрешность реконструкции профиля не выше 0,5—1,0 нм, т. е. десятые доли процента длины волны. Таким образом, по результатам расчёта в предположении полной идентичности всех пикселей матрицы приёмника изображения теорети-

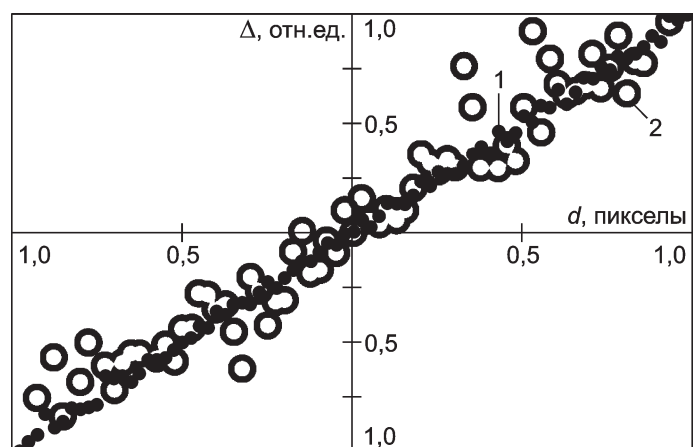


Рис. 2. Моделирование субпиксельного позиционирования (истинное и оценённое смещение в единицах одного пиксела) при относительном уровне аддитивного фазового шума 1/30 (1), 1/100 (2) полной высоты профиля; размер пиксела $\lambda/5$

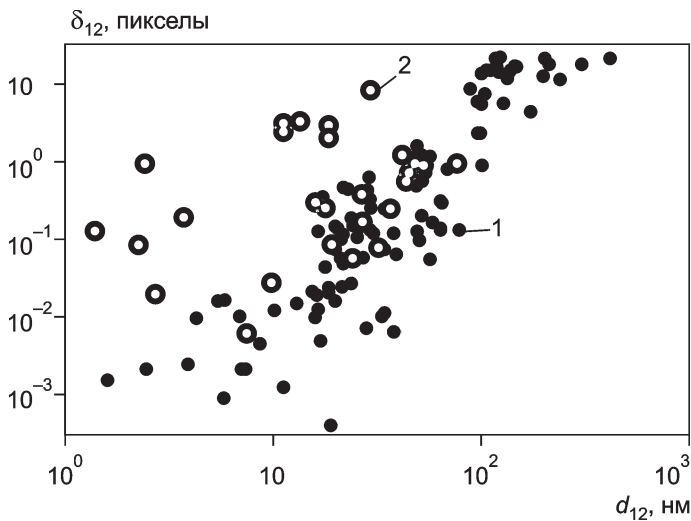


Рис. 3. Оценки относительной погрешности позиционирования микроскопов МИИ-4 (1), ZYGO (2)

чески достижима погрешность измерения смещения на уровне единиц нанометров.

Методика эксперимента. Цель экспериментальных исследований — оценка погрешности регистрации перемещений объекта в плоскости с использованием описанного выше подхода. Объект наблюдений, находящийся в поле зрения интерференционного микроскопа, последовательно смещался с некоторым шагом в горизонтальной плоскости [12, 13]. После каждого шага согласно алгоритму реконструкции формировалось двумерное распределение оптической разности хода (фазовое изображение) выбранного участка исследуемого объекта. Соответствующий цифровой массив данных необходим для расчёта взаимной корреляционной функции и определения смещений пластинки.

В качестве объекта наблюдений использовали меру (VLSI Standards Inc.), предназначенную для латеральной калибровки интерференционного микроскопа. На поверхности меры располагалась система решёток с периодом 3—500 мкм.

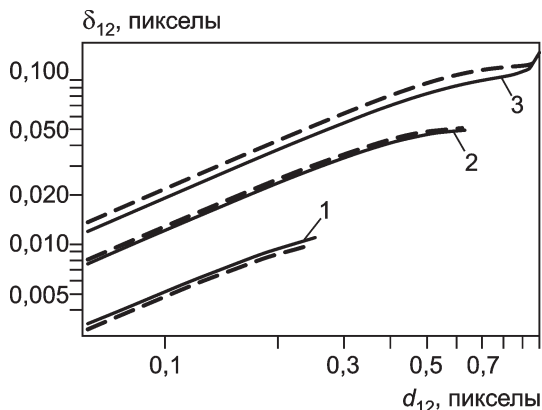


Рис. 4. Средние квадратические погрешности позиционирования пикселей матрицы из-за неидентичности их параметров, полученные численным моделированием:

1 — точное позиционирование; 2, 3 — погрешности позиционирования пиксела 20 и 40 % ширины; сплошные и штрихпунктирные линии — разброс ширины пикселей 10 и 50 %, соответственно

Решётки состояли из выступов практически прямоугольной формы с плоскими поверхностями, позволяющими получить удобные для обработки фазовые изображения. Измеренная интерференционным микроскопом высота выступов приблизительно равнялась 40 нм. Выбирали решётку с периодом 10 мкм.

Объект наблюдений устанавливали на пьезоэлектрический нанопозиционер марки NanoT115 (Mad City Labs Inc.), с помощью которого перемещали объект на заданное расстояние. Перемещения контролировали пьезорезистивным датчиком. Нанопозиционер находился на рабочем столе интерференционного микроскопа. Измерения проводили микроскопами двух типов: ZYGO NewView 6200 (Zygo Corporation), разрешение матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС) 640×480 пикселей, размер пиксела изображения 220 нм; МИА-1М, разрешение ПЗС-матрицы 1388×1036 пикселей, размер пиксела изображения 132 нм.

Выполняли несколько серий измерений. В каждой серии задавали определённый шаг смещения в горизонтальной плоскости. Задаваемое суммарное смещение было не меньше размера пиксела. Выбирали шаги следующих размеров: 10, 20, 50 нм, значительно уступающие по значению как длине волны, так и размеру пиксела.

Погрешность смещений, обрабатываемых нанопозиционером, независимо оценивали по результатам специальной серии измерений микроскопом ZYGO NewView6200. С помощью поворотного зеркала, установленного после объектива с большим рабочим расстоянием, оптическую ось микроскопа наклоняли на 90°. С погрешностью 1 нм были измерены смещения позиционера по осям X, Y. Установили, что точности определения смещения по показаниям собственного датчика нанопозиционера недостаточно для использования этих показаний в качестве эталонных, они могут служить лишь для ориентировочной оценки задаваемых смещений. Поэтому далее изучали относительную погрешность измерений — разность оценок $\delta_{12}(d_{12}) = \Delta_{12} - \Delta_1 - \Delta_2$, где Δ_1 , Δ_2 — оценки двух последовательных смещений объекта d_1 , d_2 ; Δ_{12} — оценка суммарного смещения объекта $d_{12} = d_1 + d_2$. Такая разность оценок позволяет исследовать влияние инструментальных погрешностей и шумов, это влияние в каждой отдельной оценке по ряду соображений можно считать независимым. При этом можно получить приближённую оценку снизу абсолютной погрешности определения субпиксельного смещения в рамках предлагаемого подхода.

Выбирали пары приблизительно равных смещений $d_1 \approx d_2 \approx d_{12}/2$. Модули вычисленной оценки разности $\delta_{12} = \Delta_{12} - \Delta_1 - \Delta_2$ наносили на график в логарифмическом масштабе отдельно для каждого типа прибора (рис. 3). Относительная погрешность измерения смещений увеличивается вместе с абсолютным значением смещения. Для смещений, близких к размерам пиксела изображения, смещение составляет 10—20 нм (10—20 % размера пиксела), что не согласуется с результатами численного расчёта в предположении полной идентичности пикселей (см. рис. 2).

Влияние неоднородности пикселей матричного фотоприёмника. Матричные приёмники излучения, в том числе ПЗС-матрицы, состоят из набора элементов (пикселей) конечного размера, неидентичных друг другу. В большинстве случаев достаточно оценки чувствительности всей матрицы по интегральной чувствительности каждого пиксела. В теоретических работах принято, что матрица состоит из одинаковых пикселей бесконечно малых размеров. Однако для

прецизионных измерений индивидуальное распределение чувствительности по площади каждого пиксела оказывает существенное влияние. Поэтому существуют специальные методики измерения индивидуальных характеристик пикселей матриц в оптическом [18] и рентгеновском [19] диапазонах. Если применение методик по каким-либо причинам невозможно, то целесообразны моделирование и оценка влияния неидентичности пикселей на точность субпиксельного позиционирования.

Моделирование выполняли с учётом конечного размера пикселей и неидентичности их индивидуальных параметров. Пиксели считали однородными прямоугольниками шириной в среднем четверть периода, координаты центра тяжести и индивидуальную ширину каждого пиксела варьировали в заданных пределах. Моделирование проводили по интенсивности интерференционной картины, регистрируемой микроскопом. Восстановление фазы и амплитуды поля в микроскопе осуществляли по нескольким интерференционным картинам с помощью стандартных алгоритмов реконструкции [15]. Таким образом, результат моделирования имеет качественный характер, что является достаточным для данного исследования.

На рис. 4 показаны выборочные средние квадратические оценки относительной погрешности позиционирования от смещения $\delta_{12}(d_{12})$ по нескольким сериям моделирования с различными параметрами. Теоретические зависимости $\delta_{12}(d_{12})$ качественно соответствуют полученным в эксперименте (см. рис. 3).

Заключение. Выполнено численное моделирование процесса определения смещения объекта по его фазовому изображению, восстановленному с помощью алгоритмов реконструкции, содержащих набор интерферограмм. Интерферограммы регистрируются матричным фотоприёмником, структура пикселей которого может быть как однородной, так и неоднородной по чувствительности. Проведены экспериментальные исследования определения смещения меры с применением нанопозиционера по её фазовому изображению. При этом были использованы интерференционные микроскопы двух типов. Результаты численного моделирования согласуются с данными эксперимента.

Литература

1. Sandoz P., Friedt J.-M., Carry M. In-plane rigid-body vibration mode characterization with a nanometer resolution by stroboscopic imaging of a microstructured pattern // *Rev. Scient. Instrum.* 2007. V. 78. P. 023706.
2. Ошлаков В. Г., Цвык Р. Ш., Солдатов А. Н., Илюшин Я. А. Принципы построения лазерных лучевых инструментальных систем ориентирования. Ч. 1 // *Известия вузов. Физика.* 2013. Т. 56. № 1012. С. 90—99.
3. Ошлаков В. Г., Илюшин Я. А. Адаптивная оптимизация поляризационных характеристик активных локаторов // *Радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии.* 2013. Т. 5. № 2. С. 3—14.
4. Preusker F., Oberst J., Head J. W., Watters T. R., Robinson M. S., Zuber M. T., Solomon S. C. Stereo topographic models of mercury after three MESSENGER flybys // *Planetary and Space Sci.* 2011. V. 59. No. 15. P. 1910—1917.
5. Tian Q., Huhns M. N. Algorithms for Subpixel Registration // *Computer Vision // Graphics and Image Proc.* 1986. V. 35. P. 220—233.
6. Alliney S. Digital analysis of rotated images. // *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intell* // 1993. V. 15. P. 499—504.
7. Abdou I. E. Practical approach to the registration of multiple video images // *Proc. SPIE.* 1999. V. 2563. P. 371—382.
8. Zheng Q., Chelappa R. A computational vision approach to image registration // *IEEE Trans. Image Processing.* 1993. V. 2. P. 311—326.
9. Wong J. W., Hall E. L. Scene matching with invariant moments // *Comput. Graph. Image Proc.* // 1978. V. 8. P. 16—24.
10. Kim S. P., Su W. Y. Subpixel accuracy image registration by spectrum cancellation // *Proc. ICASSP'93.* 1993. P. 153—156.
11. Левин Г. Г., Ломакин А. Г., Илюшин Я. А., Куницын В. Е. Применение техники апертурного синтеза в оптической интерференционной микроскопии // *Оптика и спектроскопия.* 2009. Т. 107. № 2. С. 338—345.
12. Левин Г. Г., Илюшин Я. А., Минаев В. Л., Моисеев Н. Н. Определение наноперемещений объекта по оптическому фазовому изображению // *Измерительная техника.* 2010. № 7. С. 38—42.
13. Levin G., Minaev V., Moiseev N., Ilyushin Ya. Definition of object near nanometer shifting by 2D optical path difference (2010) // *Optical Information Technology, ACIT-OIT 2010: Proc. of the IASTED Intern. Conf. on Automation, Control and Information Technology,* 2010. P. 282—286.
14. Sandoz P., Bonnans V., Gharbi T. High-Accuracy Position and Orientation Measurement of Extended Two-Dimensional Surfaces by a Phase-Sensitive Vision Method // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. P. 5503—5511.
15. Surrel Y. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. No. 1. P. 51—60.
16. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1963.
17. Totzeck M., Tiziani H. J. Interference microscopy of sub-lambda structures: A rigorous computation method and measurements // *Opt. Communications.* 1997. V. 136. P. 61—74.
18. Toyozumi H., Ashley M. C. B. Intra-pixel sensitivity variation and charge transfer inefficiency — results of CCD scans // *Astronomical Society of Australia.* 2005. V. 22. P. 257—266.
19. Pivovarov M., Jones S., Bautz M., Pivovarov M., Jones S., Bautz M., Kissel S., Prigozhin G., Ricker G., Tsunemi H., Miyata E. Measurement of the Subpixel Structure of AXAF CCD's // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1998. V. 45. No. 2. P. 164—175.

Дата принятия: 25.01.2017.