

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.411.854

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-43-49

**В. И. ГУЖОВ
И. О. МАРЧЕНКО
Г. А. ПОЗДНЯКОВ
Е. Е. СЕРЕБРЯКОВА**

Новосибирский государственный
технический университет,
г. Новосибирск

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ФАЗОВОЙ ОДНОЗНАЧНОСТИ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ СИНУСОИДАЛЬНЫМИ КАРТИНАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ПЕРИОДАМИ

В статье описывается способ устранения фазовой неоднозначности при использовании серии измерений с различными периодами. Получение фазовой информации осуществляется методом пошагового фазового сдвига. Для этого на объект проецируются три или более синусоидальные картины с заданным фазовым сдвигом.

В результате расшифровки картин интенсивности получается поле фазовых величин с периодом, определяемым величиной периода проецированной синусоидальной картины. Такое же фазовое распределение можно получить и с некоторым другим периодом.

В результате вычитания фазовых картин результирующий эквивалентный период разности будет больше, чем исходные периоды. Величина эквивалентного периода обратно пропорциональна разности исходных периодов. Для увеличения области фазовой однозначности необходимо выбирать близкие периоды. Однако в этом случае растет и погрешность измерения.

Предлагаемый в статье способ предусматривает получение трех или более серий синусоидальных картин с различными периодами для освещения объекта. Снижение погрешности обеспечивается путем комбинирования значений фазы, полученных для минимального периода со значениями фазовых переходов для расширенного диапазона, что позволяет устранить эффект увеличения погрешности и, соответственно,

снизить общую погрешность определения фазы. Области фазовых переходов автоматически определяются в результате вычитания профиля объекта, полученного при измерениях с разными периодами. Поскольку области фазовых переходов однородны, то можно предложить простую процедуру усреднения. Добавляя к полученному полю фазовых переходов результаты измерения при минимальном периоде, получим измерения с минимальной погрешностью. В этом случае периоды проецируемых картин не обязательно должны быть близкими. Такой выбор периодов обеспечивает устойчивость предлагаемого метода.

Ключевые слова: структурированное освещение, пошаговый фазовый сдвиг, фазовая неоднозначность, определение профиля, фазовые методы, погрешность измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии» (Грант № 16-08-00565) и Министерством образования и науки РФ (гос. задание № 8.12007.2018/11.12).

Введение. Одним из факторов, сдерживающих широкое распространение интерференционных методов измерений, является ограниченный диапазон измерений. Фазовые значения могут однозначно восстанавливаться только в пределах периода от 0 до 2π . Причина этого является периодический характер измерений. Величина периода полос (цена интерференционной полосы) определяется значениями интерференционных полос, при которых регистрируемая интенсивность меняется от минимума до максимума.

При использовании методов голографической интерферометрии для расширения области фазовой однозначности был предложен двухчастотный метод [1–4]. Двухчастотный метод заключается в том, что на одну фотопластинку записываются две голограммы одного и того же объекта при освещении с разными длинами волн λ_1 и λ_2 . Эквивалентная длина волны определяется как

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что чем меньше разность между длинами используемых волн, тем больше будет эквивалентная длина волны.

Основной проблемой при использовании этого метода является возрастание погрешности при определении фазы с расширенным диапазоном.

Этот недостаток можно преодолеть при использовании проекционных методов структурированного освещения, в которых можно проецировать синусоидальные картины с различными периодами [5–9].

Получим две серии синусоидальных картин с различными размерами периода T_1 и T_2 . Величину профиля можно определить с помощью следующего выражения:

$$C \cdot h(x, y) = \left[\frac{\Phi(x, y)}{2\pi} \right] T, \quad (2)$$

где T — период, C — системная константа, зависящая от оптической схемы, а $\Phi(x, y)$ — абсолютное значение фазы.

Выражение, которое связывает фазу Φ , период T и величину профиля $h(x, y)$, имеет вид:

$$\Phi(x, y) = [C \cdot h(x, y) / T] \cdot 2\pi. \quad (3)$$

Если мы делаем фазовые измерения с двумя периодами T_1 и T_2 , то разность двух фаз в пределах периода будет определяться следующим выражением:

$$\Delta\Phi_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = [C \cdot h(x, y) / T_{12}^{eq}] \cdot 2\pi, \quad (4)$$

где $T_{12}^{eq} = T_1 \cdot T_2 / |T_2 - T_1|$ — эквивалентный период. Выражение имеет такой же вид, что и (1).

В результате двух фазовых измерений с разными периодами мы можем получить только значения, определенные в пределах периода от 0 до $2\pi - \varphi_1$ и φ_2 . Абсолютная фаза Φ связана с φ отношением $\Phi = \varphi \pmod{2\pi}$. Пользуясь этим выражением из (4), можно получить

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{12} &= \Delta\Phi_{12} \pmod{2\pi} = [\Phi_1 - \Phi_2] \pmod{2\pi} = \\ &= [\varphi_1 - \varphi_2] \pmod{2\pi} = \\ &= \left\{ [C \cdot h(x, y) / T_{12}^{eq}] \cdot 2\pi \right\} \pmod{2\pi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, если сделать два измерения, при которых период эквивалентной полосы T_{12}^{eq} будет больше, чем измеряемый диапазон, то задача устранения фазовой неоднозначности будет решена в пределах диапазона, определяемого эквивалентным периодом.

Недостатком этого метода является увеличение погрешности при определении эквивалентной фазы. В статье предложен способ, который позволяет устранить данный недостаток.

Определение фазового распределения. Для освещения объекта необходимо сформировать серию картин с синусоидальным распределением с заданным сдвигом фаз между ними. Общее выражение для компьютерного моделирования синусоидальных картин, ориентированных вдоль оси x :

$$I(i, j) = a_r \cos\left(\frac{2\pi N_p}{N_x} i + \delta_i\right), \quad (6)$$

где N_x — число точек в массиве, N_p — требуемое число полос, δ_i — фазовый сдвиг.

В зависимости от величины сдвигов и их количества существуют различные алгоритмы расшифровки. Нами получено общее выражение для определения фазового распределения [10, 11]

$$\delta\varphi = \arctan \frac{\vec{I} \cdot \vec{C}^\perp}{\vec{I} \cdot \vec{S}^\perp}, \quad (7)$$

где $\vec{I} = (I_0, \dots, I_{m-1})^T$ — набор измеренных интенсивностей с различными фазовыми сдвигами δ_i в каждой синусоидальной картине (x, y) , $\vec{C} = (\cos \delta_0, \dots, \cos \delta_{m-1})^T$, $\vec{S} = (\sin \delta_0, \dots, \sin \delta_{m-1})^T$, размерность векторов определяется m -числом фазовых сдвигов δ_i , \vec{S}^\perp и \vec{C}^\perp вектора, ортогональные векторам \vec{S} и \vec{C} соответственно. Используя выражение (7) по серии синусоидальных картин, получим поле фаз.

Расширение области фазовой неоднозначности с помощью эквивалентного периода. Для увеличения периода однозначного определения фазы используем метод эквивалентного периода. Определить разность фаз:

- разность фаз $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$;
- если $(\varphi_1 - \varphi_2) < 0$, то к φ_{12} добавляем 2π .

Из выражения (5) видно, что по этой разности можно определить профиль в пределах эквивалентного периода.

Пусть цена тона (период) выражается в пикселях. Если взять фазовые распределения с периодом $T_1 = 60$ точек и $T_2 = 90$, тогда эквивалентный период составит $T_{12}^{eq} = T_1 T_2 / |T_2 - T_1| = 60 \cdot 90 / (90 - 60) = 180$ точек [12].

Алгоритм хорошо работает, если исходные фазы, определенные в пределах периода, определяются точно. Однако, если значения фаз определяются с некоторой ошибкой, погрешность определения профиля резко возрастает,

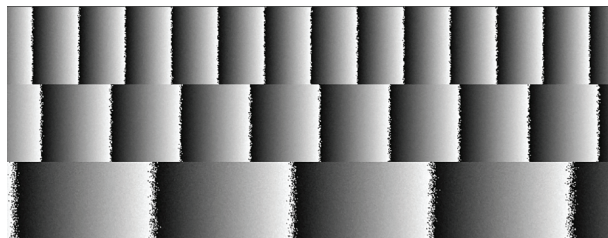


Рис. 1. Фазовые распределения: сверху с периодом 60 пикселей, в центре с периодом, равным эквивалентной длине волны 90 пикселей, снизу с периодом, равным эквивалентной длине волны 180 точек

что при высокоточных измерениях ограничивает область применения этого метода.

При 20 % случайного шума от амплитуды заданных синусоид погрешность определения фазы составит около 6,64 % от 2π при синусоиде с периодом 60 и 7,2 % при синусоиде с периодом 90. Снижение погрешности при определении фазы объясняется фильтрующими свойствами выражения (7). При выбранных параметрах расшифровки снижение относительной погрешности составляет примерно 3 раза.

Выбирая разный период синусоид, можно получить распределение фаз с различным периодом. Из двух синусоидальных наборов с периодом 60 и 90 пикселей получим два фазовых распределения φ_1 и φ_2 , по которым можно определить фазу с эквивалентным периодом (рис. 1). Эквивалентный период — 180 пикселей.

Из картины фазового распределения, соответствующего эквивалентной длине волны (нижняя часть рис. 1), видно, что при переходе через ноль

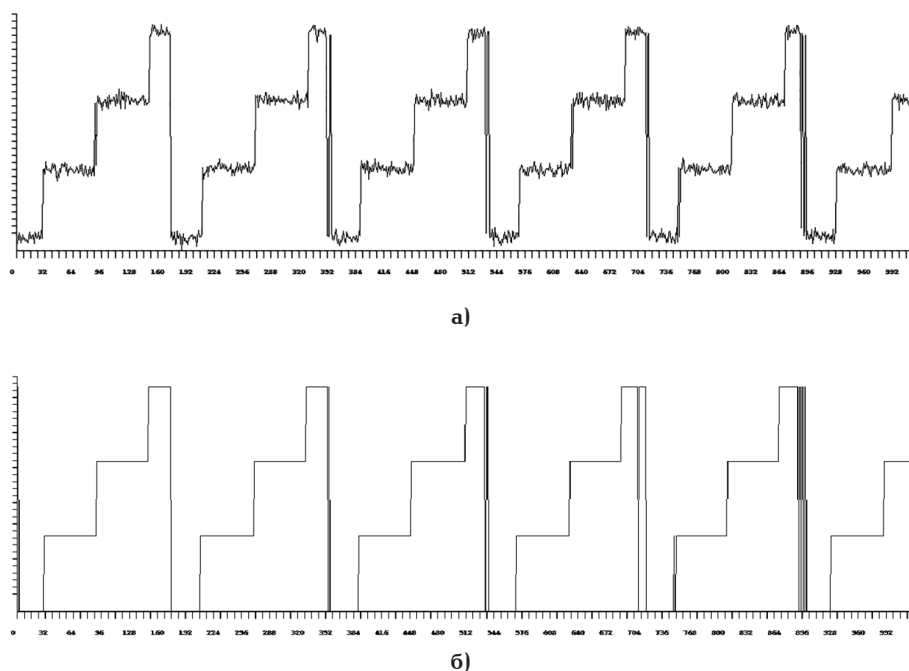


Рис. 2. Разность профиля с периодом, равным эквивалентной длине волны 180 точек, и профиля с периодом 60 пикселей (а) и разность профиля с периодом, равным эквивалентной длине волны 180 точек, и профиля с периодом 60 пикселей после устранения шумов (б)

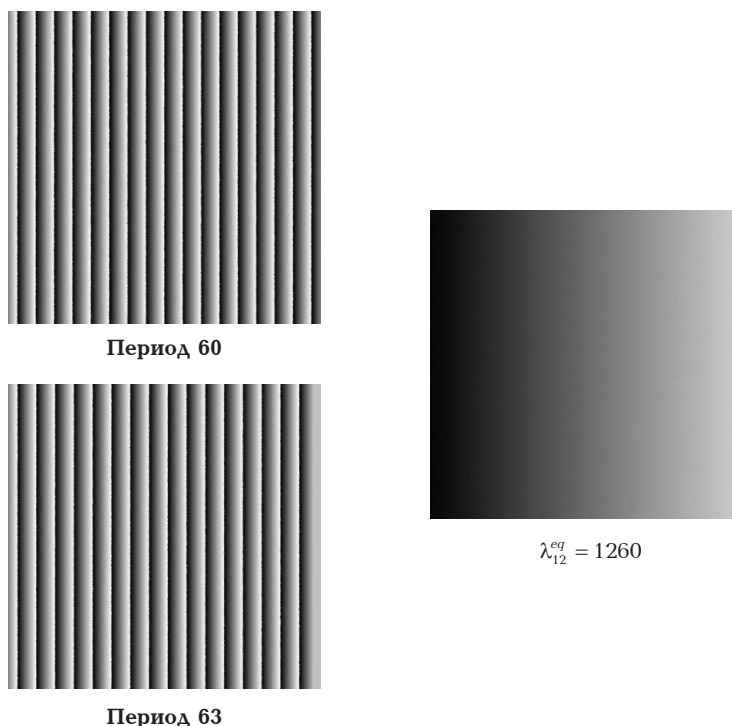


Рис. 3. Восстановление полной фазы с помощью эквивалентной длины волны (размер изображения 1024×1024 точек)

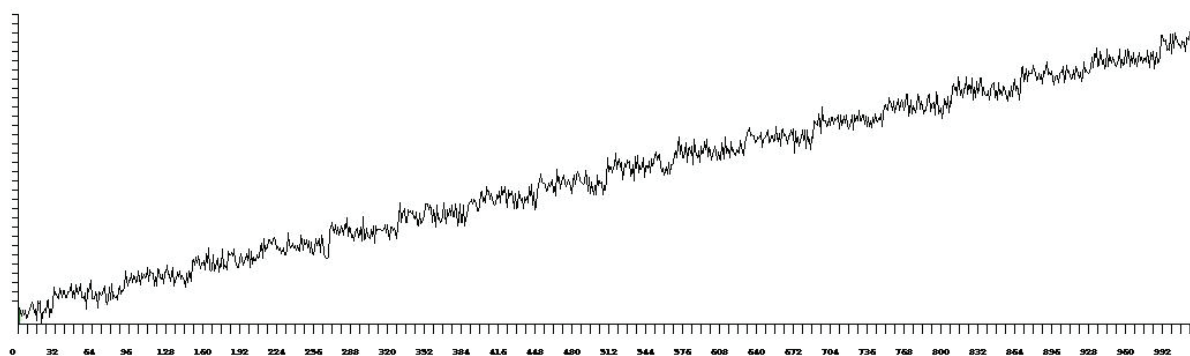


Рис. 4. Разность профиля с периодом, равным эквивалентной длине волны 1260 точек, и профиля с периодом 60 пикселей

возникают ошибки. Величину этих ошибок можно уменьшить, если учитывать величину погрешности следующим образом:

$$\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2,$$

если $\varphi_{12} < -\pi \cdot noise / 3 \Rightarrow \varphi_{12} = \varphi_{12} + 2\pi,$ (8)

где *noise* относительная погрешность при задании синусоидальной картины. Величина шума делится на 3, поскольку при определении фазы примерно настолько сокращается величина шума.

Поскольку фаза φ_{12} образуется разностью фаз φ_1 и φ_2 , ее погрешность увеличивается в два раза по сравнению с погрешностями фаз φ_1 и φ_2 соответственно.

Уменьшение погрешности метода эквивалентного периода. Профиль измеряемой поверхности с точностью до множителя *C* можно определить как

$$C \cdot h(x, y) = [\varphi_{12}] T_{eq}, \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, значение абсолютной погрешности при определении профиля объекта растет пропорционально увеличению эквивалентной длины волны. Погрешность можно уменьшить, если использовать для уточнения результирующей фазы, значения фаз при минимальном периоде.

Определим профиль объекта с помощью выражения (9) и вычтем из него профиль, полученный при минимальной длине волны (рис. 2а).

Из рис. 3 видно, что образуются однородные области, соответствующие числу фазовых переходов через период. В отсутствие шумов площадки должны быть прямыми. Для устранения шума достаточно взять ближайшее целое от деления разности профиля на $\pi \cdot \lambda_1$ и умножить целое на это же значение. В результате получим прямые площадки, соответствующие числу (рис. 2б) фазовых переходов.

Добавляя значения профиля к зонам фазовых переходов при минимальном периоде, получим распределение фаз, в котором величина шума

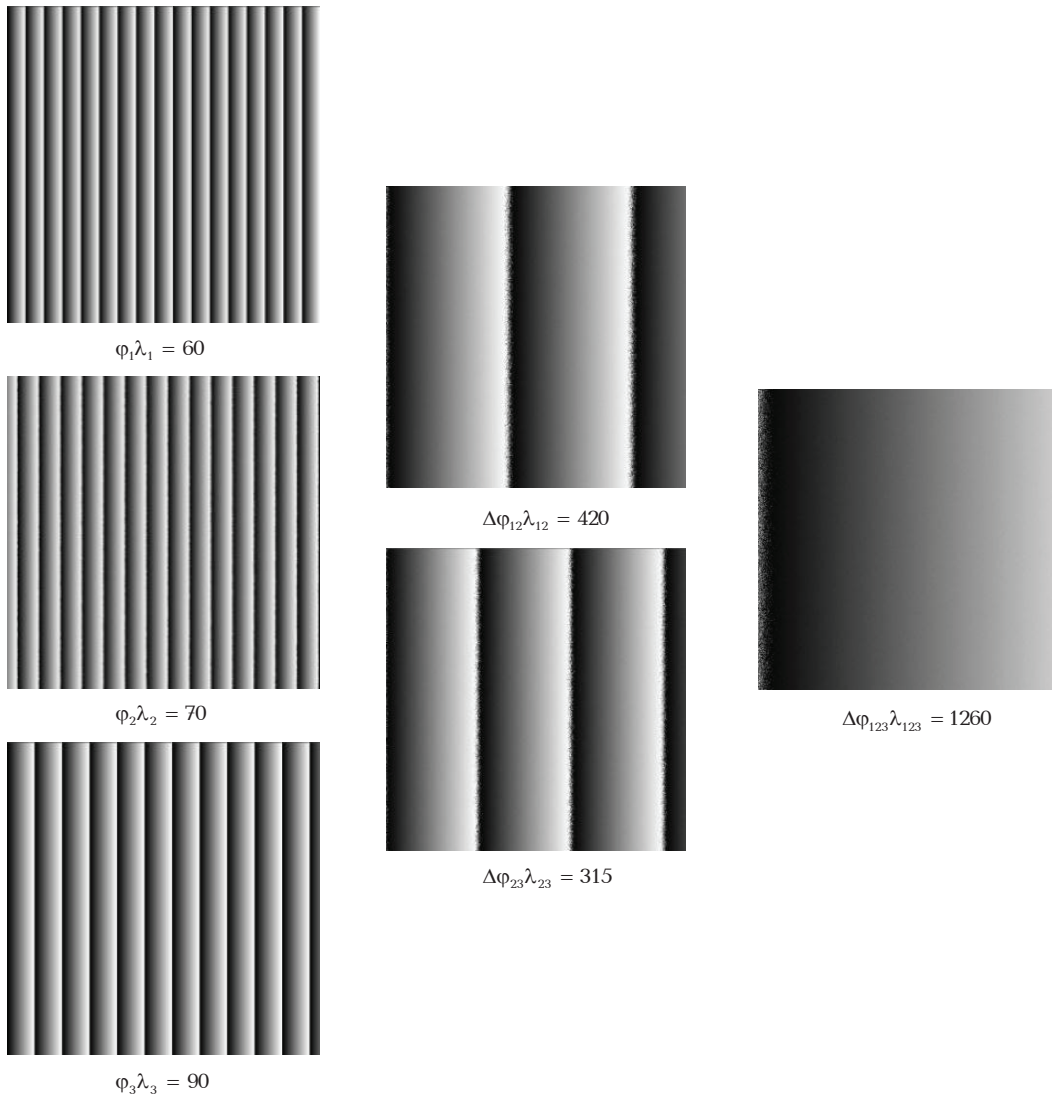


Рис. 5. Формирование разности фаз с помощью трех наборов фазовых распределений

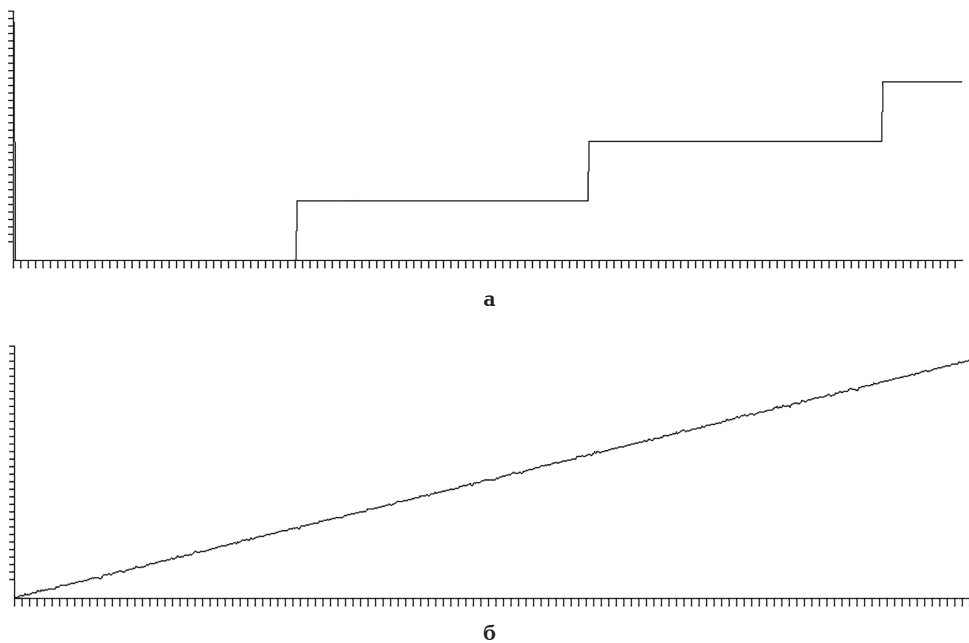


Рис. 6. Разность профиля с периодом, равным эквивалентному периоду $T_{123}=1260$ точек, и профиля с периодом $T_{23}=315$ пикселей (а) и график профиля с периодом, равным эквивалентной длине волны 1260 точек, и погрешностью, соответствующей профилю с периодом 315 пикселей (б)

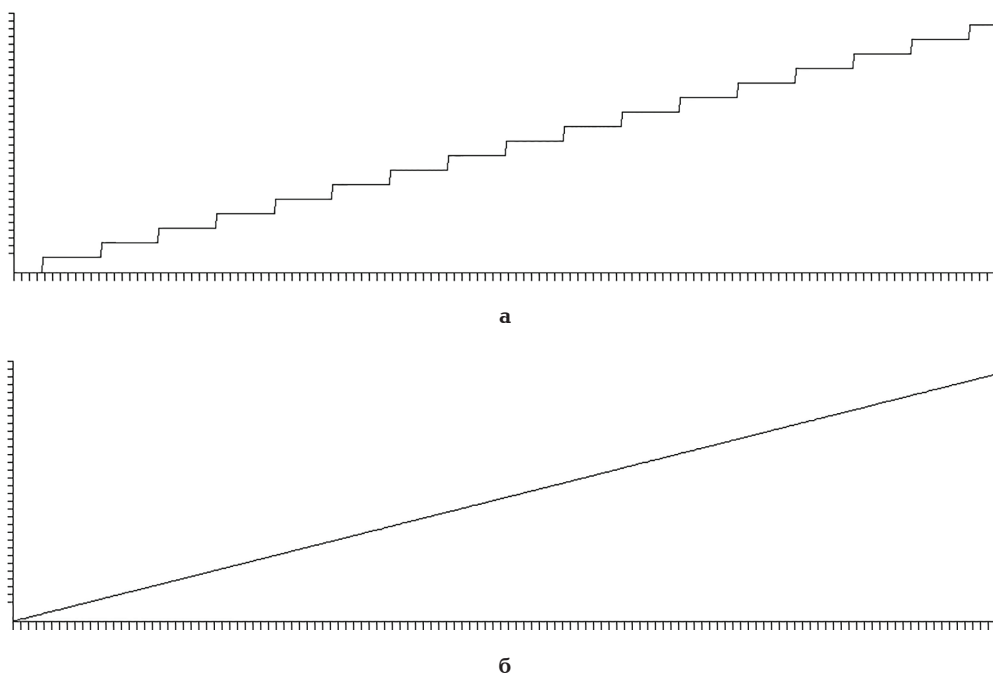


Рис. 7. Разность профиля с уточненным периодом, равным эквивалентной длине волны 1260 точек, и профиля с периодом 60 пикселей (а) и профиль с периодом, равным эквивалентной длине волны 1260 точек, и погрешностью, соответствующей профилю с периодом 60 пикселей (б)

не будет превышать величины шума в исходном распределении фазы, а диапазон будет определяться эквивалентным периодом.

Из рис. 1 видно, что выбранной величины эквивалентной волны не хватает для определения полной фазы по всему массиву. Для увеличения диапазона необходимо выбрать такие значения, чтобы знаменатель в выражении для определения эквивалентной длины волны (1) или эквивалентного периода становился меньше. Зафиксируем размер первой волны и будем уменьшать размер второй, тогда при величинах периодов 60 и 63 получим размер эквивалентной волны 1260 (20 максимальных периодов 63), который позволяет устранить фазовую неоднозначность по всему полю (рис. 3).

Однако в этом случае не удастся определить зоны переходов через период. Это видно из графика фазовых переходов (рис. 4) для периодов 1260 и 60. Прямые горизонтальные площадки из-за влияния шума слились и выделить их нельзя.

В этом случае может быть использован процесс увеличения диапазона по серии трех фазовых распределений. В результате мы можем получить эквивалентную волну с помощью следующего выражения

$$T_{123}^{eq} = T_{12}^{eq} T_{23}^{eq} / |T_{12}^{eq} - T_{23}^{eq}|. \quad (10)$$

Для примера, выберем три синусоидальные картины с тремя периодами $T_1 = 60$ пикселей, $T_2 = 70$ пикселей, $T_3 = 90$ пикселя [10].

Результирующая эквивалентная длина волны составит $T_{123} = 1260$ пикселей (рис. 5), как и для случая двух длин волн 60 и 63 пикселя (рис. 1). Но в этом случае можно методом обратной разветки снизить погрешность.

На первом этапе необходимо определить разность профилей, полученных с T_{123} и T_{23} (рис. 6а). Такая промежуточная разность вычисляется, т.к. сразу же определить разность профилей, полученных с T_{123} и T_1 , не удастся из-за высокого уровня шумов при определении профиля с увеличенным диапазоном.

Затем восстанавливается полный профиль с уровнем шумов, соответствующих T_{23} и динамическим диапазонам, соответствующим периоду $T_{123} = 1260$ пикселей (рис. 6б).

На втором этапе уже определяется разность уточненного профиля (рис. 7а) и профиля, полученного с периодом T_1 , и восстанавливается полный профиль, но уже с уровнем шумов, соответствующих минимальному периоду (рис. 7б).

Таким образом, используя приведенный алгоритм, нарастания ошибок удаётся избежать.

Заключение. Представлен способ снижения погрешности при расширении области фазовой неоднозначности при проекции на объект синусоидальных картин с различными периодами. Способ основан на автоматическом определении зон фазового перехода и уточнении значений, полученных при расширенном диапазоне, величинами с минимальной ошибкой. Для расширения динамического диапазона необходимо увеличивать число проецируемых картин. Выбор периодов зависит от возможности автоматического определения зон фазовых переходов.

Достоинством метода является алгоритмическая простота. К недостаткам можно отнести — сложность подбора необходимых периодов, невозможность устранения фазовой неоднозначности в случае резких скачков и ограничение максимального диапазона при коррекции погрешностей.

При большом числе полос лучшие результаты дает алгоритм устранения фазовой неоднозначности с полосами, периоды которых являются взаимно простыми числами [13–16]. Однако используемый математический аппарат основан на целочисленной арифметике, который редко используется в инженерной практике.

Приведенные в статье результаты получены при использовании языка программирования C# в бесплатной среде разработки Visual Studio Community 2017.

Библиографический список

- Hildebrand B. P., Haines K. A. Multiple Wavelength and Multiple Source Holography Applied to Contour Generation // *JOSA*. 1967. Vol. 57, Issue. 2. P. 155–162. DOI: 10.1364/JOSA.57.000155.
- Де С. Т., Козачок А. Г., Логинов А. В., Солодкин Ю. Н. Измерение параметров рельефа поверхностей методом двухдлинноволновой голографической интерферометрии // *Голографические измерительные системы: сб. науч. тр. / НЭТИ. Новосибирск, 1976. С. 23–29.*
- Cheng Y-Y., Wyant J. C. Multiple-wavelength phase shifting interferometry // *Applied Optics*. 1985. Vol. 24 (6). P. 804–807. DOI: 10.1364/AO.24.000804.
- Creath K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry // *Applied Optics*. 1987. Vol. 26 (14). P. 2810–2816. DOI: 10.1364/AO.26.002810.
- Srinivasan V., Liu H. C., Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects // *Applied Optics*. 1984. Vol. 23 (18). P. 3105–3108. DOI: 10.1364/AO.23.003105.
- Zhang S. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement. Stony Brook University. 2005. P. 127. URL: <https://engineering.purdue.edu/ZhangLab/publications/papers/2005-zhang-thesis.pdf> (дата обращения: 11.10.2018).
- Zhang S., Yau S.-T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector // *Applied Optics*. 2007. Vol. 46 (1). P. 36–43. DOI: 10.1364/AO.46.000036.
- Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques // *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. Vol. 48 (2). P. 149–158. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.03.008.
- Гужов В. И., Ильиных С. П., Уберт А. И. Проекционный метод измерения рельефа // *Научный вестник НГТУ*. 2012. № 1 (46). С. 23–28.
- Гужов В. И., Ильиных С. П., Хайдуков Д. С., Кузнецов Р. А. Новый метод калибровки фазовых сдвигов // *Научный вестник НГТУ*. 2013. № 1 (50). С. 185–189.
- Ильиных С. П., Гужов В. И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // *Автометрия*. 2002. № 3. С. 123–126.
- Wang Y., Zhang S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation // *Optics Express*. 2011. Vol. 19 (6). P. 5149–5155. DOI:10.1364/OE.19.005149.
- Виноградов И. М. Основы теории чисел. М.: Наука, 1972. 168 с.
- Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. В 3 т. Т. 2. Получисленные алгоритмы / пер. Г. П. Бабенко, Ю. М. Баяковского; под ред. К. И. Бабенко, В. С. Штаркмана. М.: Мир, 1977. 724 с.
- Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм // *Оптика и спектроскопия*. 1988. Т. 65, вып. 5. С. 1123–1128.
- Гужов В. И., Ильиных С. П., Кузнецов Р. А., Вагизов А. Р. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии // *Автометрия*. 2013. Т. 49, № 2. С. 85–91.

ГУЖОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Системы сбора и обработки данных».

SPIN-код; 6116-7131

AuthorID (РИНЦ): 111678

AuthorID (SCOPUS): 6603882920

Адрес для переписки: vigguzhov@gmail.com

МАРЧЕНКО Илья Олегович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Системы сбора и обработки данных».

SPIN-код; 7744-1591

AuthorID (РИНЦ): 583134

AuthorID (SCOPUS): 57193877973

Адрес для переписки: i.o.marchenko@gmail.com

ПОЗДНЯКОВ Григорий Александрович, аспирант кафедры «Системы сбора и обработки данных».

Адрес для переписки: worlaff@gmail.com

СЕРЕБРЯКОВА Екатерина Евгеньевна, ассистент кафедры «Системы сбора и обработки данных».

Адрес для переписки: silver-kate94@mail.ru

Для цитирования

Гужов В. И., Марченко И. О., Поздняков Г. А., Серебрякова Е. Е. Расширение области фазовой однозначности проекционных методов при освещении синусоидальными картинками с различными периодами // *Омский научный вестник*. 2019. № 1 (163). С. 43–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-43-49.

Статья поступила в редакцию 27.11.2018 г.

© В. И. Гужов, И. О. Марченко, Г. А. Поздняков, Е. Е. Серебрякова