

**2018 14TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC-
TECHNICAL CONFERENCE ON ACTUAL
PROBLEMS OF ELECTRONIC INSTRUMENT
ENGINEERING (APEIE) – 44894
PROCEEDINGS**

APEIE – 2018

In 8 Volumes

Volume 3

Novosibirsk

2018

**ТРУДЫ XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

АПЭП – 2018

В 8 томах

Том 3

Новосибирск

2018

Уменьшение погрешности при устранении фазовой неоднозначности методом эквивалентной длины волны

Владимир И. Гужов, Сергей П. Ильиных, Григорий А. Поздняков
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация – В этой статье описывается способ снижения погрешности определения фазы при многочастотном методе устранения фазовой неоднозначности в цифровых, в том числе голографических измерительных системах. Предлагаемый способ предусматривает получение серии интерференционных картин с различными длинами волн и их расшифровку методом фазовых сдвигов. Снижение погрешности обеспечивается путем комбинирования целочисленных значений фазы, полученных для эквивалентной длины волны с усредненными значениями фазы исходных длин волн, что позволяет устранить эффект накопления погрешности и соответственно снизить общую погрешность определения фазы. Это позволяет расширить область применимости метода устранения фазовой неоднозначности при использовании нескольких длин волн. Метод был апробирован путем расшифровки тестовых картин с заданным уровнем шума. Метод показал устойчивость к фазовым и амплитудным шумам.

Ключевые слова – Интерферограмма, анализ, эквивалентная длина волны, фазовая неоднозначность.

I. ВВЕДЕНИЕ

УСТРАНЕНИЕ фазовой неоднозначности важная составная часть алгоритмов анализа интерферограмм в цифровых интерференционных, в том числе, голографических измерительных системах. Одним из популярных методов является расширение динамического диапазона фазовой однозначности путем синтеза эквивалентной длины волны из двух или более интерферограмм полученных при разных длинах волн источника освещения [1]. Недостатком такого подхода является увеличение погрешности определения фазы пропорционально отношению исходной и синтезированной длин волн. Авторами статьи предложен способ устранения фазовой неоднозначности, который позволяет устранить данный недостаток.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Двухчастотный метод голографической интерферометрии 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 [1]

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

Чем меньше разность между длинами используемых волн, тем больше будет эквивалентная длина волны. С метрологической точки зрения использование метода двух частот более предпочтительно, поскольку длины волн определяются с меньшей погрешностью, чем углы или коэффициенты преломления. Основной проблемой при использовании этого метода является сложность подбора длин волн лазерного излучения, используемого для освещения.

Этот недостаток легко преодолевается при использовании проекционных методов, в которых можно легко проецировать синусоидальные картины с различными периодами [2].

Для этого мы получаем две серии синусоидальных картин с различным размером периода λ_1 и λ_2 .

При использовании метода пошагового фазового сдвига результирующие значения профиля будут меняться от 0 до цены полосы $-\lambda$. Цена полосы определяет величину профиля объекта в каких-либо единицах измерения (микрометрах, миллиметрах) при динамическом диапазоне фазы от 0 до 2π .

Величину профиля можно определить с помощью следующего выражения

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

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

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

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

Если мы делаем фазовые измерения с двумя длинами волн λ_1 и λ_2 , то разность двух фаз в пределах периода будет определяться следующим выражением

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

где $\lambda_{12}^{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_2 - \lambda_1|$ - эквивалентная длина волны.

В результате двух фазовых измерений с разными длинами волн можно получить только значения, определенные в пределах периода от 0 до 2π для φ_1 и φ_2 . Абсолютная фаза Φ , связана с φ отношением $\varphi = \Phi \pmod{2\pi}$. Пользуясь этим выражением из (4) можно получить

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

Таким образом, если синтезировать эквивалентную длину волны λ_{12}^{eq} , то период соответствующей ей интерференционной полосы будет больше, чем измеряемый диапазон, то задача устранения фазовой неоднозначности будет решена в пределах диапазона, определяемого эквивалентной длиной волны.

Выражение (5) вычисляется следующим образом:

- определяем разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2$;
- если $(\varphi_1 - \varphi_2) < 0$, то к $\varphi_1 - \varphi_2$ добавляем 2π .

Пусть цена полосы (период) выражается в пикселях. Если взять фазовые распределения $\lambda_1 = 60$ точек и $\lambda_2 = 90$, тогда эквивалентная длина волны составит $\lambda_{12}^{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_2 - \lambda_1| = 60 \cdot 90 / (90 - 60) = 180$ точек (рис. 1).

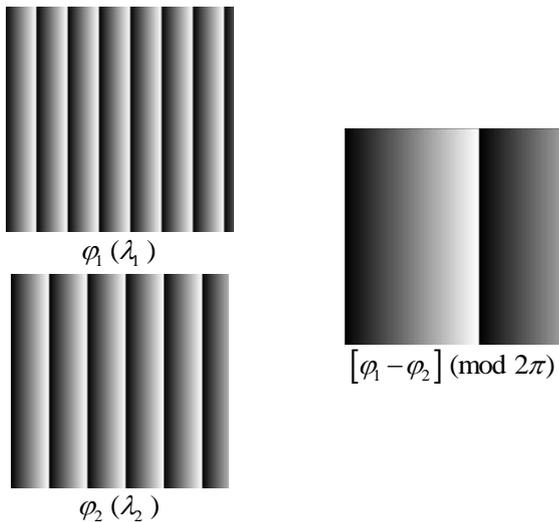


Рис. 1. Восстановление полной фазы с помощью эквивалентной длины волны.

Алгоритм достаточно прост, поэтому в настоящее время это наиболее распространенный алгоритм расширения диапазона фазовых измерений. Алгоритм хорошо работает, если исходные фазы, определенные в пределах

периода определяются точно. Однако если фазы определяются с некоторой ошибкой, погрешность определения профиля резко возрастает. При прецизионных измерениях это ограничивает область применения метода.

III. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО АЛГОРИТМА

Пусть мы имеем 4 интерференционные картины с фазовым сдвигом между ними 0, 90, 180 и 270 градусов (рис. 2 слева) с погрешностью 20% от значения амплитуды синусоиды. Погрешность моделируется добавлением случайного шума к значению синусоидальной картины.

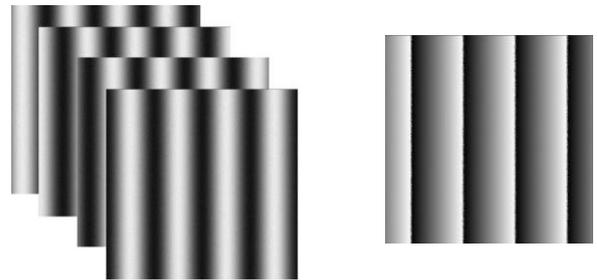


Рис. 2. Синусоидальные картины (слева) и восстановленное по ним фазовое распределение в диапазоне от 0 до 2π (справа).

По синусоидальным картинам восстановим фазовое распределение (рис. 2 справа) методом пошагового фазового сдвига с помощью выражения

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}. \quad (6)$$

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. (рис. 3). Снижение погрешности при определении фазы объясняется фильтрующими свойствами выражения (6). Для этой формулы расшифровки снижение погрешности составляет примерно 3 раза.

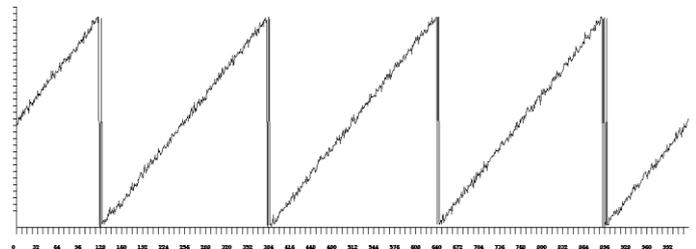


Рис. 3. График по центральному сечению одной синусоиды с периодом 256 точек и 20% шумом и фазовое распределение в диапазоне от 0 до 2π .

Выбирая разный период синусоид можно получить распределение фаз с различным периодом. Из двух

синусоидальных наборов с периодом 60 и 90 пикселей (все поле 1024) получим два фазовых распределения φ_1 и φ_2 , по которым можно определить $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, если $\varphi_{12} < 0$, то к φ_{12} добавляется 2π (рис. 4). Период φ_{12} равен периоду эквивалентной длины волны – 180 пикселей.

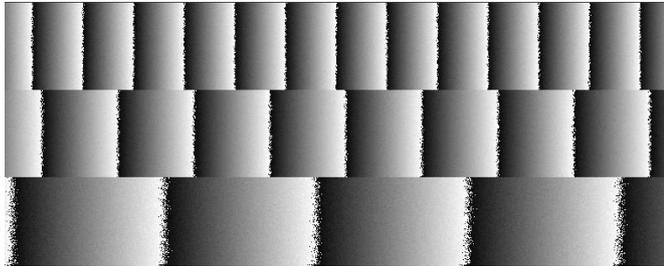


Рис. 4. Фазовые распределения: сверху с периодом 60 пикселей, в центре с периодом равным эквивалентной длине волны 90 пикселей, снизу с периодом равным эквивалентной длине волны 180 точек.

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).

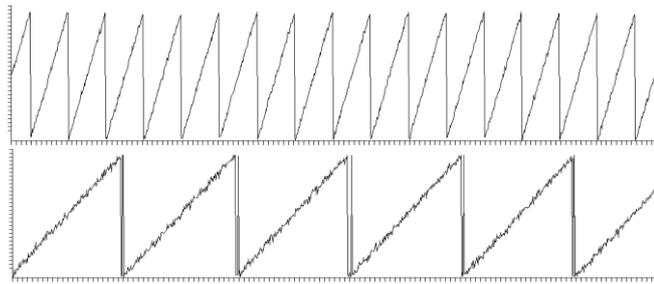


Рис. 5. Графики по строке фазовых распределений: φ_1 с периодом 60 пикселей (вверху), φ_{12} с периодом равным эквивалентной длине волны 180 точек (внизу).

Профиль измеряемой поверхности можно определить как

$$C \cdot h(x, y) = [\varphi_{12}] \lambda_{eq} \quad (7)$$

Таким образом, значение погрешности при определении профиля объекта растет пропорционально увеличению эквивалентной длины волны.

Из графика фазового распределения, соответствующего эквивалентной длине волны (нижняя часть рис. 5) видно, что погрешность увеличивается при переходе через ноль. Её можно уменьшить, если учитывать величину погрешности следующим образом

$$\begin{aligned} \varphi_{12} &= \varphi_1 - \varphi_2, \\ \text{если } \varphi_{12} < -\pi \cdot \text{noise} / 3 &\Rightarrow \varphi_{12} = \varphi_{12} + 2\pi \end{aligned} \quad (8)$$

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

Точность измерений обратно пропорциональна длине волны. Поэтому вычисления с большой эквивалентной волной дают большую погрешность. Эти измерения можно использовать для разворачивания фазы в обратном направлении для других длин волн с меньшим периодом.

Поэтому можно предложить следующий алгоритм, при котором потери точности не происходит.

Определим профиль объекта с помощью выражения (7) и вычтем из него профиль, полученный при минимальной длине волны (рис. 6).

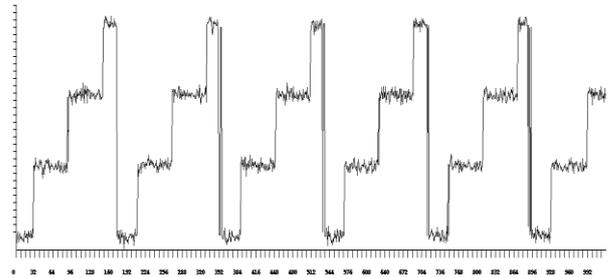


Рис. 6. Разность профиля с периодом равным эквивалентной длине волны 180 точек и профиля с периодом 60 пикселей.

Из рисунка 6 видно, что площадки, соответствующие добавлению переходов через период достаточно сильно зашумлены. В отсутствие шумов площадки должны быть прямыми. Для этого достаточно взять ближайшее целое от деления разности профиля на $\pi \cdot \lambda_1$. Затем эту величину умножить на $\pi \cdot \lambda_1$. В результате получим прямые площадки, соответствующие переходам через период (рис. 7)

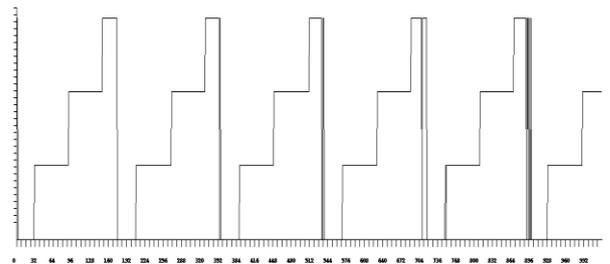


Рис. 7. Разность профиля с периодом равным эквивалентной длине волны 180 точек и профиля с периодом 60 пикселей без вычислительных погрешностей.

Добавляя к нему значения профиля при минимальном периоде, получим распределение фаз, в котором величина шума не будут превышать величины шума в исходном распределении фазы (см. рис. 8). При большом числе полос лучшие результаты дает алгоритм устранения фазовой неоднозначности, с интерференционными полосами, периоды которых являются взаимно простыми числами [3]. Значительное увеличение области фазовой однозначности возможно при использовании нескольких фазовых картин с различными периодами.

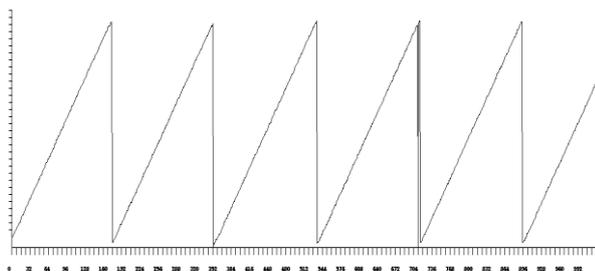


Рис. 8. Профиль с периодом равным эквивалентной длине волны и с минимальной погрешностью.

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый способ определения фазы при многочастотном методе устранения фазовой неоднозначности. Способ основан на комбинировании целочисленных значений фазы, полученных для эквивалентной длины волны с усредненными значениями фазы исходных длин волн, что позволяет устранить эффект накопления погрешности и соответственно снизить общую погрешность определения фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Де С.Т., Козачок А.Г., Логинов А.В., Солодкин Ю.Н. Измерение параметров рельефа поверхностей методом двухдлинноволновой голографической интерферометрии. // Голографические измерительные системы: Сб. научных трудов. – НЭТИ. – Новосибирск. – 1976 г.– с.23 – 29.
- [2] Wang Y., Zhang S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation. – Optics Express. – 2011. – Vol. 19, No. 6, pp.5149 – 5155
- [3] Гужов В.И. Методы измерения 3D профиля объектов. Фазовые методы.: Учеб.пособие.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 83с.



Владимир Гужов – профессор кафедры ССОД факультета Автоматики и вычислительной техники в Новосибирского Государственного Технического университета, профессор, доктор технических наук. Он является автором более 200 научных работ. Область научных интересов: программные системы, высокоточные измерения.



Сергей Ильин – доцент кафедры Вычислительная техника Новосибирского Государственного Технического университета, кандидат технических наук, доцент. Он является автором более 130 научных трудов, в том числе 1 учебник НГТУ и 4 патентов. Область научных интересов: разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах.



Григорий Поздняков – аспирант кафедры ССОД факультета Автоматики и вычислительной техники в Новосибирского Государственного Технического университета.