

С. В. Двойнишников^{1}, В. О. Зуев¹, В. В. Рахманов¹, А. Ю. Кравцова¹*

Постобработка результатов измерения методом фазовой триангуляции в условиях нестационарного внешнего освещения

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: dv.s@mail.ru

Аннотация. Исследование направлено на усовершенствование методов фазовой триангуляции и структурированного освещения в контексте обработки результатов измерений с применением фазовой триангуляции в условиях изменяющегося внешнего освещения. Основой метода является частотный анализ полученных данных и фильтрация на основе амплитуды первой гармоники в спектре сигнала. Разработанный подход реализован в виде алгоритма фильтрации обработанных точечных облаков в измерительном комплексе, использующем метод фазовой триангуляции. Экспериментальная проверка показала, что разработанный метод является эффективным. Этот метод может быть перспективным для использования в системах, которые измеряют трехмерную геометрию с помощью фазовой триангуляции, особенно в ситуациях, когда внешнее освещение непостоянно.

Ключевые слова: постобработка данных, расшифровка изображений, фазовая триангуляция

S. V. Dvoynishnikov¹, V. O. Zuev¹, V. V. Rakhmanov¹, A. Yu. Kravtsova¹

Post-processing of Measurement Results Using the Phase Triangulation Method under Conditions of Non-stationary External Lighting

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: dv.s@mail.ru

Abstract. The research focuses on advancing phase triangulation and structured lighting techniques, specifically enhancing methods for post-processing measurement outcomes using phase triangulation in environments with varying external lighting conditions. The methodology relies on frequency analysis of acquired data and filtering based on the amplitude criterion of the first harmonic in the signal's frequency decomposition. The proposed approach is realized through an algorithm for filtering the measured point cloud within a measurement system that employs phase triangulation. An experimental demonstration showcasing the functionality of the proposed method was conducted. This approach holds promise for applications in systems measuring three-dimensional geometry via phase triangulation in scenarios characterized by non-stationary external lighting conditions.

Keywords: post-processing, image decoding, phase triangulation

Введение

В современных отраслях промышленности, включая авиационную, автомобильную, машиностроительную и медицинскую промышленность, существует строгая необходимость в производстве компонентов и конструкций с высоким

уровнем точности. Именно поэтому развитие методов измерения трехмерной геометрии является важным аспектом в современной промышленности [1].

Точные измерения трехмерной геометрии позволяют проектировать и изготавливать компоненты с высокой степенью точности и надежности. Это особенно важно при производстве сложных конструкций, где даже малейшее отклонение может привести к серьезным последствиям.

Методы фазовой триангуляции и структурированного освещения активно развиваются и совершенствуются [2]. При измерении трехмерной сцены методом фазовой триангуляции и структурированного освещения для достижения высоких метрологических характеристик важно обеспечить неподвижность измерительной сцены. Кроме того, необходимо обеспечить постоянство внешнего освещения поверхности измеряемого объекта во время измерения. Это важно по причине того, что изменяющаяся в процессе измерения дополнительная освещенность измеряемой поверхности может внести дополнительные искажения в результат измерения [3]. Для снижения влияния нестационарного внешнего освещения на процесс измерения, как правило, используют усиление светового потока системы излучения измерителя по сравнению с внешним освещением [4], увеличение набора экспериментальных данных [5–6], применение узкополосной оптической фильтрации для снижения влияния внешнего освещения на процесс измерения [7].

При обработке результатов измерения различные области анализируемых изображений будут «видеть» области поверхности, попадающие в тень, либо не освещенные источником структурированной засветки, которые с текущего ракурса измерительного комплекса не могут быть измерены. В результате такие ошибочно измеренные точки дают случайный шум на итоговом результате измерений и должны быть отфильтрованы в процессе постобработки результатов измерения. Как правило, фильтрацию при постобработке выполняют по анализу амплитуды на изображении при реализации метода фазовой триангуляции и выбирают пороговое значение, ниже которого считают, что эта точка не может быть измерена корректно. В случае нестационарного освещения фильтрация экспериментальных данных по разбросу амплитуды дает плохой результат. Это связано с тем, что амплитуда сигнала, который фотоприемник фиксирует из-за изменений внешнего освещения, может превышать пороговое значение интенсивности в значительной степени.

Исследование направлено на усовершенствование техник обработки данных, полученных с помощью фазовой триангуляции, при условиях переменного освещения. Предлагаемое решение основано на время-частотном анализе амплитуды регистрируемого сигнала и фильтрации по критерию порогового значения амплитуды первой гармоники.

Описание метода

Данные, полученные в результате экспериментальных измерений, могут быть отображены следующим образом:

$$I(x, y, i) = A(x, y) + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta(i)) + R(x, y, i), \quad i \in 1..N, \quad (1)$$

где $I(x, y, i)$ обозначает интенсивность света, захваченную на i -м снимке контролируемого объекта; $\varphi(x, y)$ является двумерным распределением фазовой разности, содержащим данные о пространственном положении объекта; $\delta(i)$ указывает на фазовый сдвиг, применяемый измерительной системой для получения последовательных снимков; $A(x, y)$ относится к фоновой интенсивности, которая фиксируется при отсутствии освещения объекта структурированным светом; $V(x, y)$ выражает уровень видимости структурированной засветки; $R(x, y, i)$ связано с интенсивностью шума и влиянием внешнего освещения на зарегистрированную интенсивность; N – число фазовых сдвигов, применяемых в данной методике.

Для точного определения трехмерного контура объекта, необходимо вычислить фазовое значение $\varphi(x, y)$ для каждой точки с координатами (x, y) на изображении. Анализ упрощается, если сфокусироваться на интенсивности света в определенной точке с координатами (x, y) . Это даст более простую и наглядную форму формулам, представленным ниже:

$$I(i) = A(x, y) + V \cos(\varphi + \delta(i)) + R(i), \quad i \in 1..N, \quad (2)$$

Характер функции $R(i)$ в общем случае может быть любым. В случае постоянной фоновой интенсивности $R(i) = \text{const}$.

В частотном представлении слагаемое $V \cos(\varphi + \delta(i))$ выражения (2) дает пик на частоте $2\pi/N$ в результате разложения функции с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [13]. Постоянная составляющая дает пик на нулевой частоте, который можно убрать с помощью вычитания среднего значения. Амплитуда составляющей сигнала на частоте $2\pi/N$ сравнивается с средней амплитудой сигнала, нормированной на коэффициент, определяющий чувствительность к шуму.

В итоге, алгоритм сводится к сравнению двух величин: F_1 и F_2 :

$$F_1 = \left| \sum_{k=1}^N \left(I(k) - \frac{\sum_{i=1}^N I(i)}{N} \right) e^{\frac{-2\pi i}{N}(k-1)} \right|, \quad (3)$$

$$F_2 = K \frac{\sum_{j=1}^N \left| \sum_{k=1}^N \left(I(k) - \frac{\sum_{i=1}^N I(i)}{N} \right) e^{\frac{-2\pi i}{N}(j-1)(k-1)} \right|}{N}, \quad (4)$$

где K – нормирующий коэффициент, определяющий, во сколько раз амплитуда полезного сигнала должна быть больше средней амплитуды сигнала.

Измеренная точка будет вычислена и принята, как достоверное измерение, если $F_1 > F_2$.

Экспериментальные результаты

Предложенный алгоритм постобработки применен для фильтрации результатов измерения в условиях внешнего освещения с динамически меняющимся освещением. Измеряемая сцена включала плоскую поверхность и модель лопасти гидротурбины – измеряемый объект с характерными размерами 20x10x10 см. На рис. 1 показан пример изображения, зарегистрированного фотоприемником в процессе измерения методом фазовой триангуляции при фазовом сдвиге проецируемого сигнала, равном 0. Видно, что на изображении есть области, которые попали в тень, и области, которые не попали в область освещенности источником засветки.

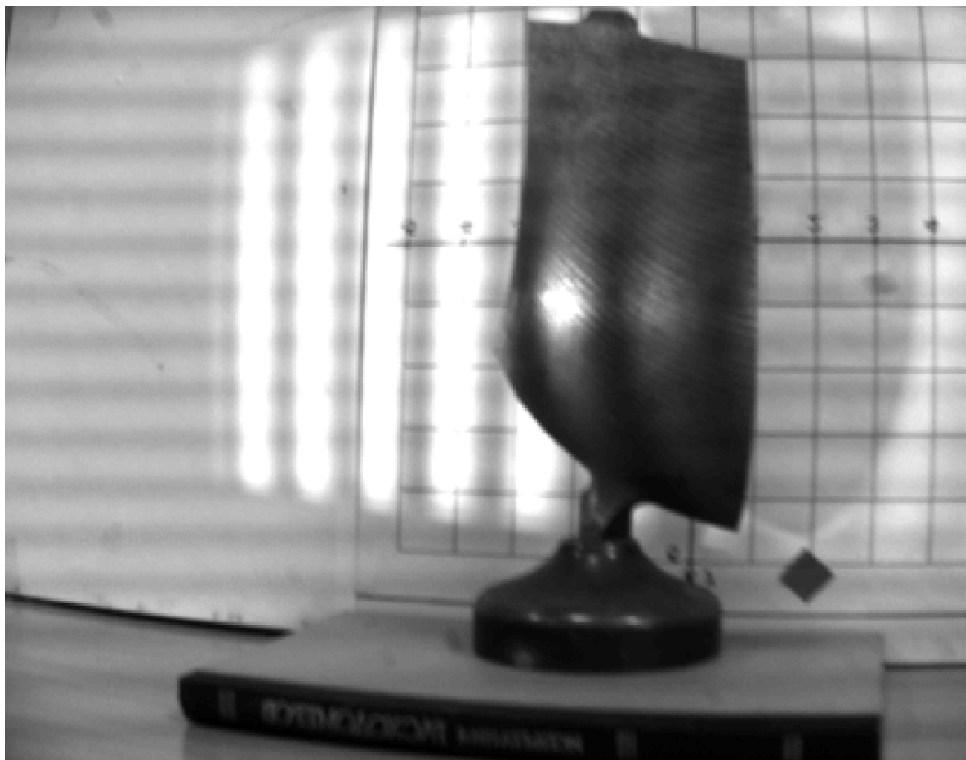


Рис. 1. Пример зарегистрированного фотоприемником изображения при формировании структурированного освещения источником излучения

На рис. 2 показано фазовое изображение, кодирующее восстановленную фазу проецируемого гармонического сигнала. Видно, что области, которые не попали в освещение структурированной засветки, имеют периодическую структуру, которая, по-видимому, обусловлена периодической структурой внешнего освещения.

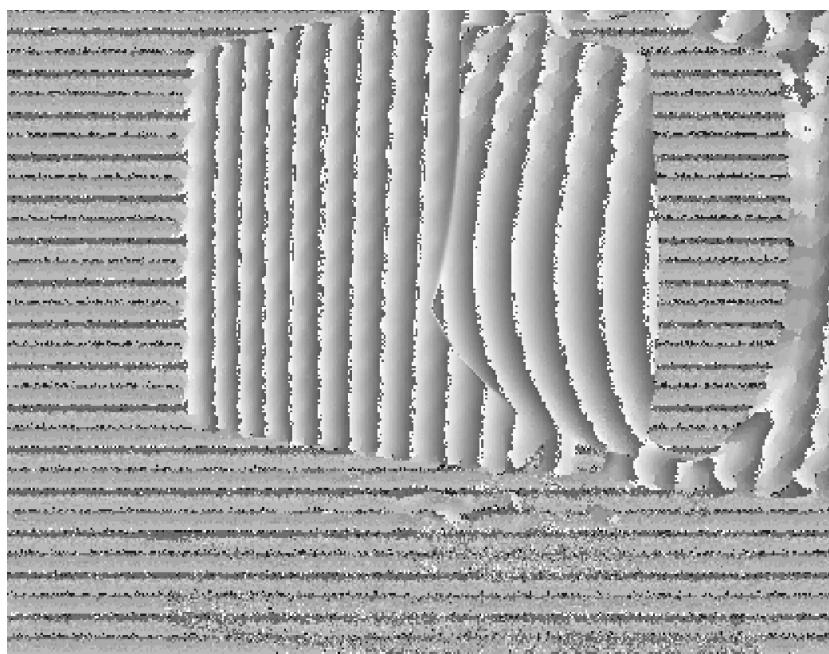


Рис. 2. Изображение фазы, созданное с использованием метода фазовой триангуляции при переменном внешнем освещении

Результаты постобработки результатов измерения на основе фильтрации по частотному наполнению зарегистрированной интенсивности представлены на рис. 3. Здесь области изображения, в которых зарегистрированная фаза является недостоверной, помечены черным цветом.

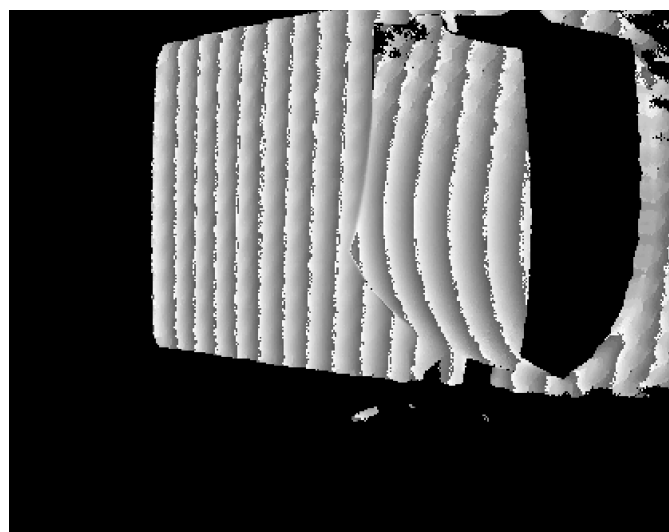


Рис. 3. Результат постобработки фазового изображения, полученный фильтрацией на основе частотного анализа принимаемых данных

Результаты постобработки, представленные на рис. 3, демонстрируют высокую эффективность предложенного алгоритма фильтрации результатов измерения для измерений в условиях нестационарного внешнего освещения.

Заключение

В данной работе описывается подход к фильтрации или очистке данных, которые фотодетектор собирает в ходе использования фазовой триангуляции для измерений, проводимых при колеблющемся уровне окружающего освещения. В основе метода лежит частотный анализ принимаемых данных и фильтрация по критерию амплитуды первой гармоники в частотном разложении сигнала. Предложенный метод реализован в виде алгоритма фильтрации измеренного облака точек в измерительном комплексе, реализующем метод структурированной триангуляции по фазовым изображениям. Была проведена экспериментальная проверка эффективности разработанного метода. Показан большой потенциал для применения в устройствах, предназначенных для определения трехмерных форм на основе фазовой триангуляции при измерениях в условиях нестационарного внешнего освещения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин, В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 3–12.
2. Kabardin I., Dvoynishnikov S., Gordienko M., Kakaulin S., Ledovsky V., Gusev G., Zuev V., Okulov V. Optical Methods for Measuring Icing of Wind Turbine Blades // *Energies* 2021, 14, 6485. DOI: 10.3390/en14206485.
3. Angelsky O.V., Bekshaev A.Y., Hanson S.G., Zenkova C.Yu., Mokhun I.I., Zheng J. Structured Light: Ideas and Concepts // *Frontiers in Physics*, V.8, 2020. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00114>.
4. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // *Opt. Lasers Eng.* 48(2), 149–158 (2010).
5. C.Zuo, T.Tao, S.Feng, L.Huang, A/Asundi, Q.Chen Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second // *Optics and Lasers in Engineering*, V.102, 2018, pp. 70–91.
6. Михляев С.В. Применение методов оптической триангуляции для измерения уровня расплава при выращивании кристаллов // *Автометрия*. – 2003. – Т. 39, № 5. – С. 30–41.
7. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Кабардин И.К., Рахманов В.В., Зуев В.О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприемника. Измерительная техника. 2022;(6):36-40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-36-40>.

© С. В. Двойнишников, В. О. Зуев, В. В. Рахманов, А. Ю. Кравцова, 2024