

С. В. Двойнишников^{1}, Г. В. Бакакин¹, М. В. Кашкарова¹, М. А. Воробьев¹*

Численный алгоритм расшифровки фазовых изображений в условиях нелинейности тракта источник-приемник излучения

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

Аннотация. Задача исследования заключается в разработке методик обработки фазовых изображений, отличающихся стойкостью к шумовым воздействиям и искажениям нелинейного характера. Разрабатываемые методики предназначены для применения в измерительных системах, функционирующих на базе триангуляционного подхода и использующих принципы структурированного или пространственно модулированного света. В рамках работы разработан алгоритм декодирования фазовых изображений, который основан на итеративном снижении различий между модельной функцией и результатами измерений, а также учете нелинейности в передающе-приемном тракте измерительного комплекса. Отличительной чертой предложенного алгоритма является использование квадратичного многочлена для поиска модельной функции, что обеспечивает устойчивость метода к нелинейным искажениям, происходящим от степенных преобразований в передающе-приемном тракте.

Ключевые слова: расшифровка изображений, фазовая триангуляция, численный алгоритм

S. V. Dvoynishnikov^{1}, G. V. Bakakin¹, M. V. Kashkarova¹, M. A. Vorob'ev¹*

Numerical Algorithm for Decoding Phase Images under Conditions of Nonlinearity of the Radiation Source-Receiver Path

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

Abstract. The study focuses on advancing methods for processing phase images that are resilient to noise and nonlinear distortions, suitable for application in measurement systems utilizing the triangulation method and structured illumination principle. The research introduces an algorithm for deciphering phase images through an iterative approach to minimize the deviation between the model function and measurement outcomes, while compensating for the nonlinearity in the transmit-receive path of the measurement complex. A notable aspect of the proposed algorithm is the representation of the model function as a second-degree polynomial, ensuring the method's robustness against nonlinear distortions stemming from power-law transformations in the transmit-receive path.

Keywords: image decoding, phase triangulation, numerical algorithm

Введение

В настоящее время в современной науке и промышленности задача повышения точности измерений является актуальной и востребованной в связи с необходимостью повышения показателей производительности и качества конеч-

ной продукции. Оптимизация технологических процессов производства и развитие научных исследований требуют использования передовых методов измерений, которые обеспечивают надежные и точные измерения различных функциональных параметров в промышленности и науке. Одним из активно развивающихся направлений совершенствования измерительных технологий является применение оптических методов для измерения линейных величин в высокотехнологических отраслях промышленности и науки. Такие методы характеризуются высокой точностью измерений и минимальным воздействием на измеряемый объект. Более того, оптические методы позволяют проводить измерения в различных условиях, что делает их незаменимыми инструментами для широкого спектра научных и промышленных прикладных задач.

Оптические методы измерения геометрических параметров обладают значительными преимуществами в сравнении с традиционными контактными методами измерения на основе механических и электрических принципов. Прежде всего, они обеспечивают возможность измерения линейных величин с высокой точностью и скоростью, не требуя контакта с поверхностью измеряемого объекта. Это особенно ценно при работе с хрупкими, тонкими или скользкими поверхностями, где контактные методы измерения могут привести к повреждениям объекта. Другой спектр задач связан с тяжелыми свойствами измеряемой поверхности, например, в горячей металлургии, где применять контактные методы практически невозможно.

Оптические методы измерения геометрических параметров находят широкое применение в различных областях науки и промышленности, включая машиностроение, медицину, электронику, аэрокосмическую промышленность и многие другие сферы [1–2]. Благодаря оптическим методам, возможно проведение точных измерений размеров и форм деталей, контроль толщины покрытий, определение расстояний и перемещений объектов с высокой точностью. В современном мире оптические методы измерения являются неотъемлемой частью процесса контроля качества на производстве, обеспечивая точность и эффективность во многих областях науки и техники.

Методы фазовой триангуляции заслуживают особого внимания, так как они широко применяются для оптической диагностики трехмерных геометрических форм объектов в разнообразных сферах, включая металлургию, энергетику, теплофизику и гидрогазодинамику [3–4]. Благодаря своей высокой точности и возможности обеспечения измерений с высоким разрешением, эти методы стали неотъемлемой частью научных исследований и промышленного применения. В системах, работающих на основе триангуляции и пространственно модулированного освещения, а также в интерферометрических системах, фазовые изображения служат для реконструкции трехмерного профиля изучаемых объектов [5]. Это обеспечивает получение подробной информации о форме и размерах поверхности объектов, что важно для множества инженерных и научно-технических задач.

Активное развитие и совершенствование методов для реконструкции трехмерных профилей объектов на основе фазовых изображений и оптической три-

ангуляции наблюдается более 20 лет и продолжается сегодня. Основной акцент в современных исследованиях по развитию методов фазовой триангуляции исследователи делают на решение ряда важных задач с точки зрения их практического применения. Одной из ключевых задач является уменьшение времени, необходимого для измерений [6], что позволит более эффективно оценивать параметры движущихся объектов. Также значительные усилия направлены на создание методов калибровки, которые были бы одновременно быстрыми и простыми в использовании, повышая тем самым точность и надежность измерений. Использование различных подходов и методик способствует улучшению возможностей фазовой триангуляции и ее применению в широком спектре научных и промышленных областей [7].

Чтобы определить начальный фазовый сдвиг в методах фазовой пространственно-временной модуляции, применяется серия изображений с заданным изменением фазы. Однако, проблемы возникают, когда светорассеивающие свойства поверхности измеряемого объекта не соответствуют уровню освещенности сцены и динамическому диапазону фотодетектора. В таком случае некоторые зарегистрированные данные о фазовых сдвигах оказываются неточными и, более того, непригодны для дальнейших расчетов. Как правило, речь идет о результатах регистрации фазового изображения фотодетектором, когда значения интенсивности находятся на границах динамического диапазона. Это особенно актуально при работе с объектами, имеющими сложную геометрическую форму и разнообразные светорассеивающие характеристики поверхности, меняющие интенсивность падающего на фотоприемник света в широком диапазоне. Такие условия усложняют точное определение фазового сдвига и требуют использования дополнительных методов корректировки и анализа регистрируемых данных с целью обеспечения высокой точности измерений [8].

Измерение трехмерного профиля объектов с меняющейся во времени геометрией поверхности (например, при измерении геометрии произвольно движущихся объектов), необходимо обеспечить высокую скорость измерений [9] и быструю обработку с последующим анализом собранных данных [10]. Последнее требование актуально для обеспечения измерений в реальном времени. Решение этой проблемы часто включает использование методов на основе гармонической регрессии и векторного анализа систем трансцендентных уравнений, которые моделируют связь между фазовыми сдвигами и интенсивностью света на зарегистрированных фотоприемником изображениях. К сожалению, известные методы характеризуются нестабильной работой при возникновении случайных помех в приемно-передаточном тракте измерительной оптической системы. Более того, при попытках увеличения точности измерения с помощью увеличения разрешения фоторегистрирующих или формирующих засветку оптико-электронных элементов, методы могут требовать значительных вычислительных мощностей для адекватной и быстрой обработки данных. Более того, классические реализации известных методов расшифровки фазовых изображений и интерферограмм не предусматривают меняющийся характер поверхности измеряемого объекта, которая может, в общем случае, изменяться произвольно. По-

этому, развитие и совершенствование существующих методов расшифровки фазовых изображений для повышения эффективности и надежности их работы остается ключевой задачей в области фазовой оптической триангуляции.

В представленной статье предлагается инновационный алгоритм интерпретации фазовых изображений при обработке данных оптической триангуляции с использованием пространственно-временной модуляции излучения. Этот метод применяет повторяющиеся процессы для сокращения несоответствий между предполагаемой моделью и реальными данными измерений, а также вносит корректировки для искажений нелинейного характера в цепи передачи-приема измерительного тракта. Отличительная черта алгоритма заключается в использовании квадратичного полинома в качестве модельной функции, что делает метод более устойчивым к нелинейным деформациям, возникающим вследствие степенных трансформаций в цепочке передачи-приема данных, характерных для устройств формирования и регистрации изображений.

Описание алгоритма

Предложенный алгоритм реализует методику итеративного подхода, цель которого – выявление и минимизация различий между математической моделью и фактическими данными, полученными в результате измерений. В процессе анализа систематически проводятся корректировки для достижения наилучшего согласования между теоретическими предсказаниями и экспериментальными результатами. Экспериментальные данные, собранные во время измерительных процедур, могут быть описаны следующим образом:

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

где: $\delta(i)$ – вносимый сдвиг фазы между соседними изображениями пространственно модулированной засветки; A – распределение фоновой интенсивности, регистрируемое фотодетектором при формировании световой двумерной модуляции на поверхности объекта; $I(i)$ – распределение интенсивности на i -м изображении объекта под контролем; V – средняя видность серии зарегистрированных фазовых изображений; $R(i)$ – интенсивность аддитивных шумов, регистрируемых фотоприемником на фазовых изображениях, полученных при освещении поверхности излучением с пространственно-временной модуляцией интенсивности; φ – искомое распределение разности фаз между текущим фазовым изображением и опорным, содержащее информацию о дальности до исследуемого объекта; γ – параметр степенной функции гамма-коррекции в тракте источник-приемник излучения, характеризующей степенную зависимость в тракте формирования пространственно модулированного освещения; N – количество сдвигов фазы, используемое в данном эксперименте.

Определение фазового значения φ осуществляется с использованием алгоритма, который, по своей сути, схож с численным методом, представленным в исследовании [8]. Этот процесс включает в себя серию вычислительных шагов,

нацеленных на точное и быстрое определение фазы зарегистрированного системной сигнала. Для математического описания предлагаемого алгоритма введем гармоническую функцию $G(i, \omega)$:

$$G(i, \omega) = \sin(\omega + \delta(i)), \quad i \in 1..N. \quad (2)$$

В следующем шаге мы численно формируем дискретную функцию $G(I(i), \omega)$. В случае, если формула (1) включает в себя степенную зависимость, обусловленную нелинейностью приемно-передаточного тракта или гамма-коррекцией, график функции $G(I(i), \omega)$ будет иметь форму, описываемую эллипсом с нелинейными гладкими искажениями. С уменьшением разницы между ω и φ искажение графика с эллипсовидной кривой становится более выраженным из-за влияния степенной функции γ . Следовательно, для вычисления точного значения фазы φ необходимо определить функционал, который характеризует отклонение функции $G(I(i), \omega)$ от гладкой кривой и описывается квадратичным многочленом. Для поиска $\omega \rightarrow \varphi$ необходимо построить функционал $P(\omega) \rightarrow 0$ на основе метода наименьших квадратов:

$$P(\omega) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(Q(i, \omega) - \frac{\sum_{i=1}^N Q(i, \omega)}{N} \right)^2}, \quad (3)$$

$$Q(i, \omega) = I(i) - c(\omega) \cdot G(i, \omega)^2 - b(\omega) \cdot G(i, \omega) - a(\omega). \quad (4)$$

Для вычисления значений $a(\omega)$, $b(\omega)$, $c(\omega)$ строим систему линейных уравнений вида:

$$\begin{cases} a(\omega)N + b(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega) + c(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^2 = \sum_{i=1}^N I(i) \\ a(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega) + b(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^2 + c(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^3 = \sum_{i=1}^N I(i)G(i, \omega) \\ a(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^2 + b(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^3 + c(\omega) \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^4 = \sum_{i=1}^N G(i, \omega)^2 I(i) \end{cases} \quad (5)$$

В итоге, путем применения формулы (3) определяем значение ω , при котором функционал $P(\omega)$ достигает минимального значения.

Работа алгоритма

Исследование работы алгоритма проиллюстрировано на представленных графиках. Для демонстрации устойчивости метода к помехам и нелинейным искажениям были использованы модельные данные с высоким уровнем шума. Установлены следующие параметры эксперимента: $\gamma = 5$, $N = 100$, $A = 300$, $V = 100$, $\varphi = 1,1$ радиан, $R = 300$. Таким образом, график, показывающий изменение интенсивности в зависимости от номера кадра, будет схож с представленным на рис. 1, в то время как функция $P(\omega)$ для этого конкретного примера иллюстрируется на рис. 2.

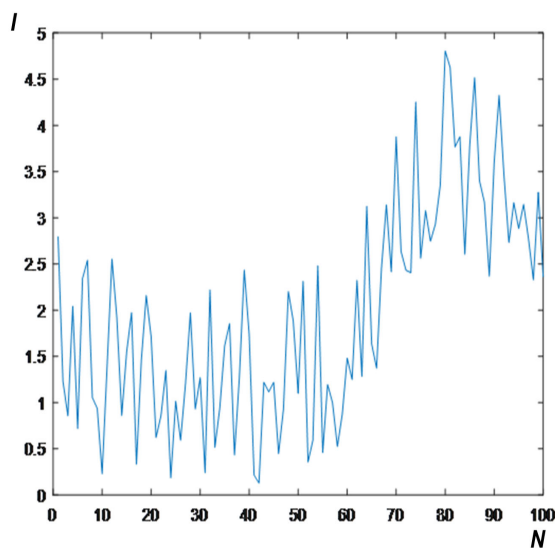


Рис. 1. Функция, отображающая изменение интенсивности в соответствии с номером кадра для сильно зашумленного сигнала и высокого степенного преобразования ($\gamma = 5$)

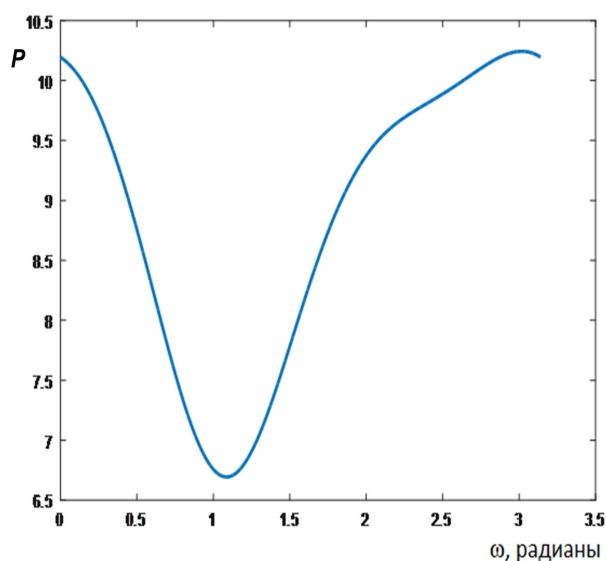


Рис. 2. Функция $P(\omega)$ для сильно зашумленного сигнала и высокого степенного преобразования

Результаты работы алгоритма показывают, что наличие значительного уровня шума в исходных данных приводит к отклонению расчетного значения параметра ω : функция $P(\omega)$ достигает минимума при $\omega=1,086$ радиан. Для сравнения, численный метод вычисления фазы на основе линейной регрессии, представленный в работе [8], дал результат $\omega=1,162$ радиан.

Очевидно, что для снижения погрешности измерений один из эффективных подходов связан с увеличением количества данных в исходной выборке согласно предложенному методу. На рис. 3 показана зависимость функции $P(\omega)$ при $N = 1000$. Заметно, что шумовая характеристика зависимости значительно уменьшилась, и функция $P(\omega)$ достигает минимума при $\omega=1,092$ радиан. Метод расчета на основе линейной регрессии для этих же данных показал результат: $\omega=1,072$ радиан.

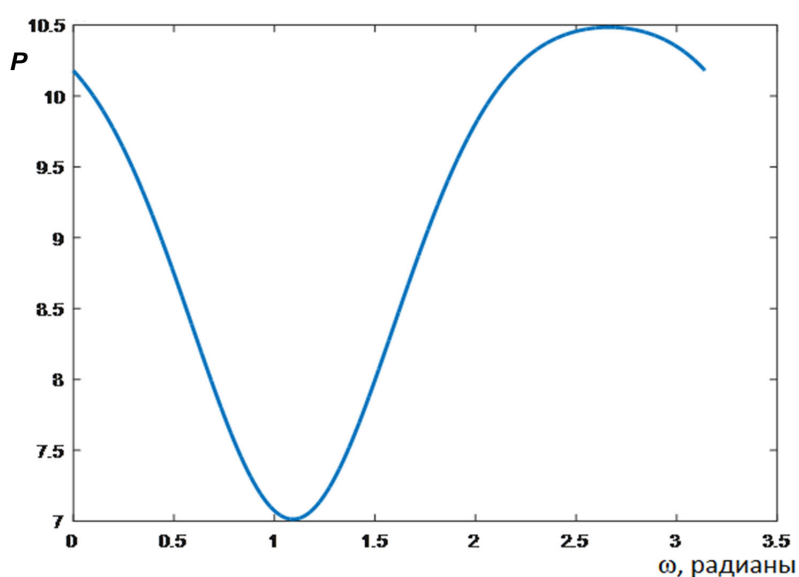


Рис. 3. Функция $P(\omega)$ при $N=1000$, соответствующая случаю с высоким уровнем шума в исходных данных

Представленные результаты явно подтверждают, что разработанный метод проявляет высокую эффективность и демонстрирует устойчивость к воздействию шумов и нелинейных искажений, обусловленных степенным характером деформаций в канале передачи данных.

Заключение

В данной исследовательской работе представлен инновационный численный алгоритм, способный декодировать фазовые изображения с высокой устойчивостью к нелинейным искажениям в канале передачи данных измерительной системы. Основой алгоритма является итерационный метод, направленный на поиск минимального отклонения между модельной функцией и результатами измерений, а также на коррекцию нелинейности в приемно-передающем тракте измерительного комплекса. Особенностью предложенного метода является ис-

пользование квадратичного полинома для поиска модельной функции, что обеспечивает стабильность алгоритма в условиях нелинейных искажений, вызванных степенными преобразованиями в приемно-передающем тракте (гамма-коррекцией).

Исследование подтвердило, что новый предложенный в работе метод эффективен для определения начального фазового сдвига на зарегистрированных изображениях в методе фазовой триангуляции. Метод также показал высокую степень надежности, обеспечивая точные результаты даже в случае зашумленных фазовых изображений и при наличии нелинейных искажений. Это открывает новые перспективы для применения данного метода в областях, где требуется высокая точность обработки изображений, несмотря на возможные помехи и искажения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мордасов М.М., Савенков А.П. Измерение геометрических параметров поверхностей раздела газожидкостных систем // Измерительная техника. 2015; (7): 47–49.
2. Марков Б.Н., Шарамков А.Б. Использование результатов калибровки координатно-измерительных машин FARO ARM для сравнительной оценки их точностных возможностей // Измерительная техника. 2014; (8): 19–21.
3. Левин Г.Г., Минаев В.Л., Иванов А.Д., Голополосов А.А., Горяинова И.В. Метрологическое обеспечение видеоизмерительных систем // Измерительная техника. 2023; (1): 24–30. DOI 10.32446/0368-1025it.2023-1-24-30.
4. Янушкин В.Н., Коляда Ю.Б. Прецизионные фотоэлектрические преобразователи перемещения в нанометрии // Измерительная техника. 2014;(8):16–18.
5. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 48(2), 149–158 (2010).
6. Lohry W., Zhang S. High-speed absolute three-dimensional shape measurement using three binary dithered patterns // Opt.Express 22, 26752–26762 (2014).
7. Armangué X., Salvi J., Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // Pattern Recognition. – 2002. – Vol. 35 (7). – P. 1617–1635.
8. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология. – 2010. – №4. – С. 15–27.

© С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, М. В. Кашкарлова, М. А. Воробьев, 2024