

Адаптивная статистическая фильтрация данных при расшифровке фазовых изображений в условиях случайных аддитивных помех фотоприемника

С. В. Двойнишников^{1}, Г. В. Бакакин¹, В. В. Рахманов¹, В. О. Зувев¹*

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

Аннотация. Предложен метод адаптивной статистической фильтрации экспериментальных данных для повышения точности измерения трехмерных геометрических параметров методами фазовой триангуляции. Метод особенно перспективен для применения в условиях измерения поверхностей с случайными светорассеивающими свойствами, ограниченного динамического диапазона фотоприемника и случайных аддитивных помех. Показана практическая ценность и эффективность предложенного подхода в обработке фазовых изображений.

Ключевые слова: фазовые изображения, аддитивные помехи, адаптивная статистическая фильтрация

Adaptive statistical filtering of data in the phase images decoding under random additive noise of a photodetector

S. V. Dvoynishnikov^{1}, G. V. Bakakin¹, V. V. Rakhmanov¹, V. O. Zuev¹*

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

Abstract. A method for adaptive statistical filtering of experimental data is proposed to reduce the measurement error of three-dimensional geometric parameters using phase triangulation methods. The method is especially promising for use under conditions of measuring surfaces with random light-scattering properties, a limited dynamic range of a photodetector, and random additive noise. The practical value and efficiency of the proposed approach in the processing of phase images is shown.

Keywords: phase images, additive noise, adaptive statistical filtering

Введение

Задача измерения 3Д геометрии актуальна и востребована во многих областях науки и техники. Одним из активно развивающихся и широко применимых методов являются оптические триангуляционные методы с пространственной модуляцией источника излучения [1–3], часто называемые методами с применением структурированной засветки. Основным преимуществом этих хорошо развитых и распространенных методов является возможность быстрой трехмерной реконструкции профиля поверхности объекта с высоким разрешением бесконтактным способом по видеоизображениям.

Методы фазовой триангуляции [4–6] обладают наиболее высокой абсолютной точностью, и это связано с устойчивостью методов фазовой триангуляции к расфокусировке оптической системы источника и приемника излучения [7–10].

В условиях аддитивных помех многие методы расшифровки фазовых изображений не обеспечивают устойчивого поведения: при увеличении уровня помех эти методы дают нелинейный рост погрешности измерения координат точек на поверхности объекта. Для решения указанной проблемы различные авторы применяют подходы на основе пространственного сглаживания фазовых изображений, что, наряду со снижением погрешности, приводит к неконтролируемым искажениям измеряемого профиля.

При измерениях в промышленных условиях важно согласовать параметры источника излучения, светорассеивающих свойств поверхности объекта и параметры фотоприемника для исключения выхода из динамического диапазона фотоприемника. Альтернативный подход может быть основан на применении устойчивого алгоритма расшифровки фазовых изображений с произвольными сдвигами [11]. Однако, в случае аддитивных помех применение таких подходов приведет к чрезмерному снижению динамического диапазона фотоприемника для исключения выхода за пределы чувствительности фотоприемника при наличии помех. Это приведет к существенному снижению точности измерений.

Данная работа нацелена на разработку алгоритма обработки фазовых изображений в условиях случайных аддитивных помех на основе адаптивной статистической фильтрации исходных данных, нацеленного на получение информации о сдвиге начальной фазы принимаемого гармонического сигнала.

Описание алгоритма

В условиях аддитивных шумов интенсивность на принимаемых фотоприемником изображениях может быть описана формулой

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

где $I(x, y, i)$ – двумерное распределение зарегистрированной фотоприемником интенсивности на i -м изображении контролируемого объекта; $A(x, y)$ – распределение фоновой интенсивности на зарегистрированных изображениях; $V(x, y)$ – средняя видность фазовой картины на зарегистрированных фотоприемником изображениях; $\varphi(x, y)$ – распределение разности фаз, определяющее информацию о дальности объекта; $\delta(i)$ – сдвиг фазы между соседними изображениями пространственно-модулированной засветки, вносимый измерительным комплексом; $K(x, y, i)$ – распределение интенсивности аддитивных шумов на i -м изображении, регистрируемое фотоприемником, N – число сдвигов, используемых в измерении.

Учитывая ограниченность динамического диапазона фотоприемника, интенсивность на принимаемых изображениях может быть выражена:

$$I_{FR}(x, y, i) = \begin{cases} I_{\max}, & \text{if } I(x, y, i) > I_{\max} \\ I(x, y, i), & \text{if } I_{\max} \geq I(x, y, i) \geq I_{\min} \\ I_{\min}, & \text{if } I(x, y, i) < I_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

При расшифровке фазовых изображений по массиву экспериментальных данных $I_{FR}(x, y, i)$ будут наблюдаться искажения, вызванные нелинейными искажениями преобразования

$$I(x, y, i) \rightarrow I_{FR}(x, y, i). \quad (3)$$

Для исключения этих нелинейных искажений авторы предлагают следующий подход. Для каждого фазового сдвига $\delta(i)$ формировать структурированную заставку несколько раз и далее анализировать полученные распределения интенсивности. Обозначим такое распределение $\delta(I, i), j = 0..K - 1$. В случае отсутствия аддитивных помех, либо при их постоянном характере значения $I_{FR}(x, y, i, j)$ не будут зависеть от параметра j . В случае наличия случайных аддитивных помех значения $I_{FR}(x, y, i, j)$ будут колебаться для каждого сочетания (x, y, i) в пределах амплитуды аддитивных помех, принимаемых фотоприемником.

Значения $I_{FR}(x, y, i, j)$ прореживаем по следующему алгоритму. Для каждой комбинации значений (x, y, i) определяем минимальное, максимальное и среднее значение интенсивности, зарегистрированное фотоприемником:

$$I_{FR} \max(x, y, i) = MAX \{I_{FR}(x, y, i, j)\}, j = 0..K - 1, \quad (4)$$

$$I_{FR} \min(x, y, i) = MIN \{I_{FR}(x, y, i, j)\}, j = 0..K - 1, \quad (5)$$

$$I_{FR} avg(x, y, i) = \frac{\sum I_{FR}(x, y, i, j)}{K}, j = 0..K - 1. \quad (6)$$

Далее для обработки фазовых изображений будет использоваться многомерный массив данных $I_{FR}^*(x, y, i)$ вместо $I_{FR}(x, y, i, j)$, который формируется следующим образом:

$$\forall(x, y, i) : I_{FR} avg(x, y, i) \in \{I_{FR}^*(x, y, i)\}, \text{if} \left(\begin{array}{l} I_{FR} \max(x, y, i) < I_{\max} \\ I_{FR} \min(x, y, i) < I_{\min} \end{array} \right). \quad (7)$$

Далее для обработки фазовых изображений может быть применен устойчивый метод расшифровки фазовых изображений на основе гармонической регрессии. Метод позволяет выполнять расшифровку фазовых изображений с произвольными сдвигами начальной фазы. Очевидно, что в итоге описанного алгоритма фильтрации данные в трехмерном контейнере $I_{FR}^*(x, y, i)$ могут иметь произвольные пошаговые сдвиги.

Представленный подход позволяет исключить нелинейные искажения, вызванные пороговой фильтрацией экспериментальных данных из-за узкого динамического диапазона фотоприемника. Кроме того, предложенный метод позволяет снизить уровень аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных в \sqrt{K} раз.

Результаты исследования

Выполнены исследования погрешности метода расшифровки фазовых изображений на модельных данных в зависимости от количества фазовых сдвигов при постоянном уровне аддитивного шума. Для сравнения взят устойчивый метод расшифровки фазовых изображений на основе гармонической регрессии и предложенный метод на основе адаптивной фильтрации данных.

Количество фазовых изображений, принимаемых с одним значением начального фазового сдвига, равно 10. Всего количество фазовых сдвигов до фильтрации менялось в диапазоне 100..2000. В каждом эксперименте сделаны 50 повторений для оценки среднеквадратичного отклонения измеренной фазы.

На рис. 1 – 4 показаны результаты работы метода расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией и метода расшифровки с фильтрацией на основе статистического анализа в зависимости от количества фазовых сдвигов. Представленные результаты демонстрируют анализ погрешности измерения для одной точки на поверхности измеренного объекта. Так как оба сравниваемых алгоритма не предусматривают анализ данных на соседних точках, а анализируют только зависимость интенсивности в точке от номера изображения, то представленные результаты можно экстраполировать на всю измеряемую поверхность.

На представленных графиках параметр уровень шума соответствует значению среднеквадратичного отклонения функции $K(x, y, i)$ в точке (x, y) выражения (1). Амплитуда сигнала соответствует величине $A(x, y) * V(x, y)$, максимальная амплитуда регистрируемой интенсивности соответствует параметру $Imax$ выражения (2), параметр $Imin = 0$. В проведенных исследованиях параметр параметру $Imax=255$, так как это соответствует фотоприемнику с 8-битным АЦП, которые чаще всего используются в задачах технического зрения.

На рисунках 1,3 представлены зависимости среднего значения измеренной фазы от количества фазовых сдвигов. При этом на различных графиках показаны результаты работы алгоритмов при различных значениях уровня регистрируемой интенсивности. Аналогично, на рисунках 2,4 представлены зависимости среднеквадратичного отклонения измеренной фазы от количества фазовых сдвигов. Графики демонстрируют, что метод обработки фазовых изображений с применением статистической фильтрации исключает систематическую погрешность измерений даже при большом уровне амплитуды регистрируемого сигнала. Метод расшифровки фазовых изображений с пороговой фильтрацией показывает систематическую погрешность результатов измерения сдвига начальной фазы формируемого источником излучения сигнала.

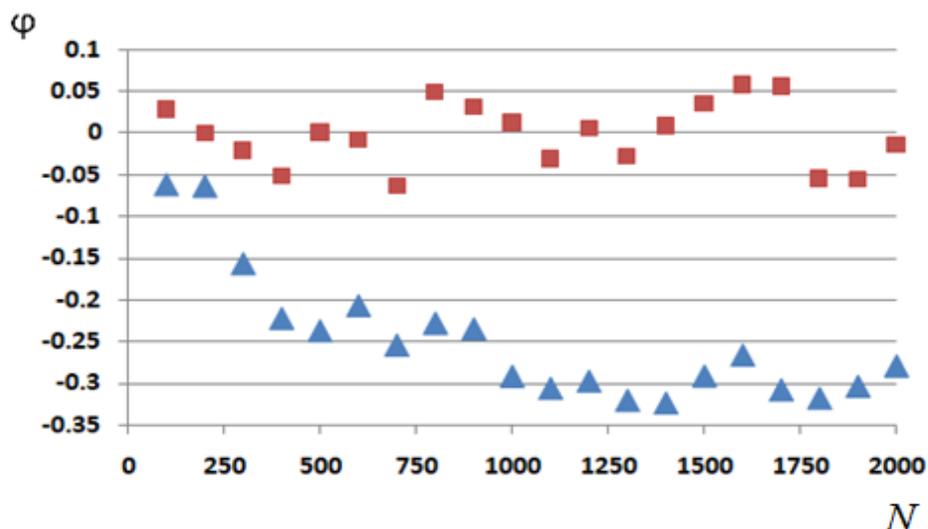


Рис. 1. Зависимость среднего значения измеренной фазы от количества фазовых изображений при уровне шума 100, максимальной амплитуде регистрируемой интенсивности 255, амплитуде сигнала 400.

Треугольные маркеры – метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с пороговой фильтрацией, квадратные маркеры - метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с фильтрацией на основе статистического анализа

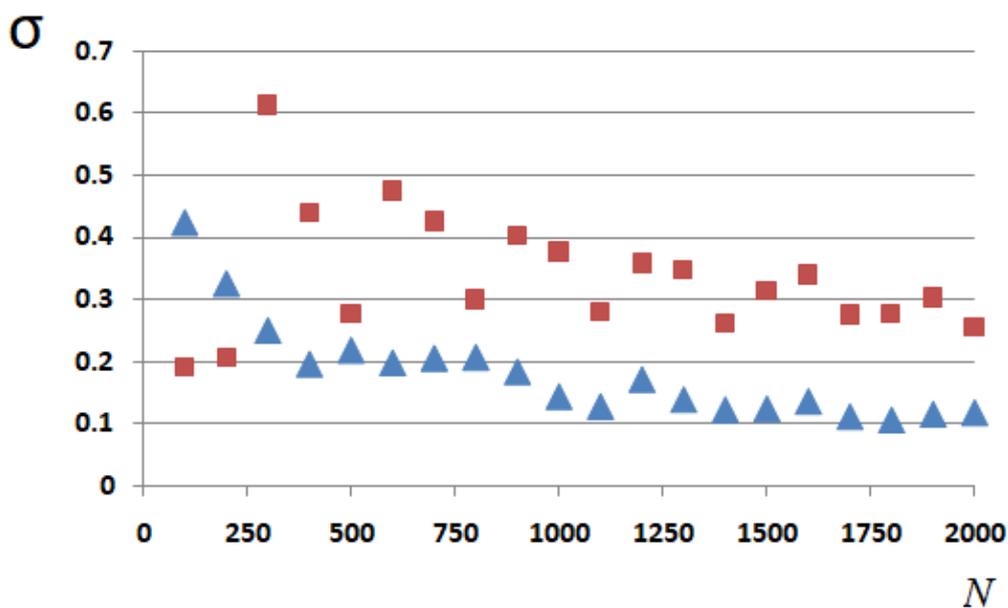


Рис.2. Зависимость среднеквадратичного отклонения измеренной фазы от количества фазовых изображений при уровне шума 100, максимальной амплитуде регистрируемой интенсивности 255, амплитуде сигнала 400.

Треугольные маркеры – метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с пороговой фильтрацией, квадратные маркеры - метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с фильтрацией на основе статистического анализа

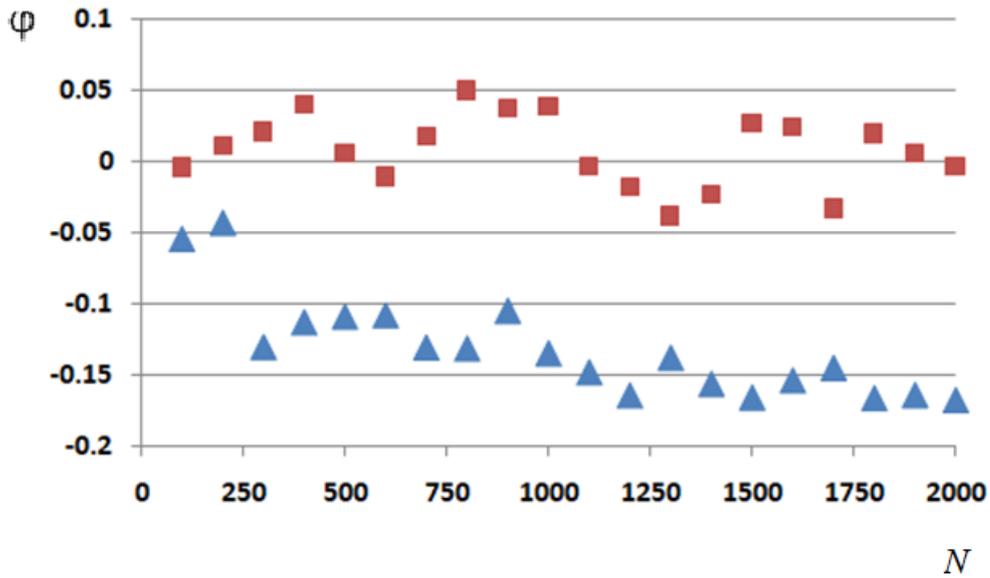


Рис. 3. Зависимость среднего значения измеренной фазы от количества фазовых изображений при уровне шума 100, максимальной амплитуде регистрируемой интенсивности 255, амплитуде сигнала 300.

Треугольные маркеры – метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с пороговой фильтрацией, квадратные маркеры - метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с фильтрацией на основе статистического анализа

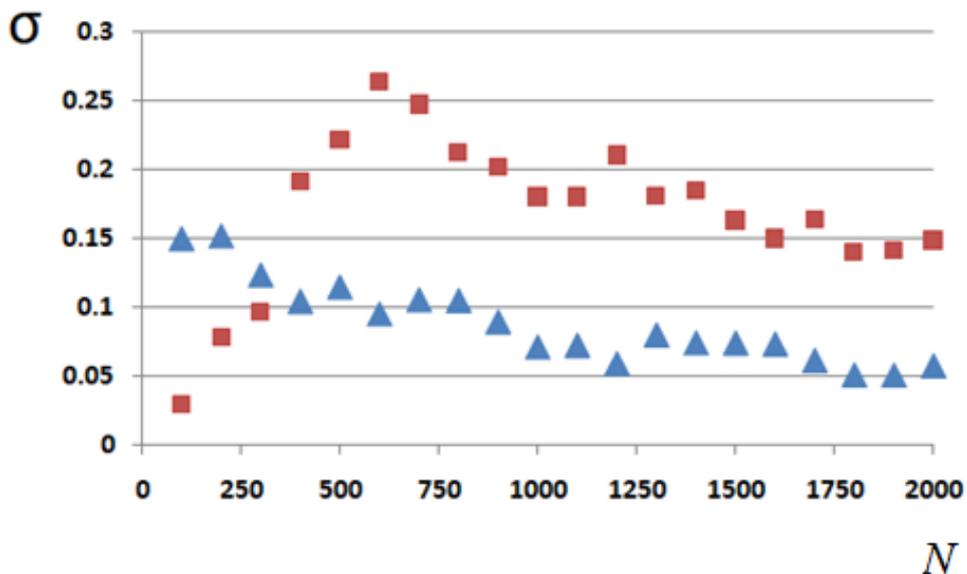


Рис.4. Зависимость среднеквадратичного отклонения измеренной фазы от количества фазовых изображений при уровне шума 100, максимальной амплитуде регистрируемой интенсивности 255, амплитуде сигнала 300.

Треугольные маркеры – метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с пороговой фильтрацией, квадратные маркеры - метод расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии с фильтрацией на основе статистического анализа

Полученные результаты исследования показывают, что метод расшифровки фазовых изображений на основе гармонической регрессии с предварительной пороговой фильтрацией данных, выходящих на пределы динамического диапазона не гарантирует внесения систематической погрешности измерения начальной фазы. Погрешность обусловлена искажением сигнала вблизи порогового значения при наличии шума. Этому недостатка лишен предложенный метод расшифровки на основе метода расшифровки фазовых изображений использующий гармоническую регрессию с фильтрацией на основе статистического анализа данных. Однако этот метод демонстрирует большую величину среднеквадратичного отклонения результатов измерения. По-видимому, это обусловлено тем, что операция фильтрации данных в этом случае отсеивает большее количество экспериментальных данных, что приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения результатов измерения сдвига начальной фазы.

Полученные результаты не демонстрируют эффекта «сходимости» результатов: на графиках не видно наглядного снижения погрешности измерений с увеличением N . Это связано с тем, что в представленных результатах взят очень высокий уровень шума, чтобы продемонстрировать эффективность предложенного метода. В результате видно, что методы достаточно быстро с увеличением N приближаются к уровню погрешности, который в дальнейшем практически не уменьшается.

Заключение

В работе предложен метод адаптивной статистической фильтрации экспериментальных данных для повышения точности измерений трехмерных геометрических параметров методами фазовой триангуляции. Метод основан на статистическом анализе экспериментальных данных и адаптивной фильтрации. В результате данный метод позволяет снизить погрешность измерения профиля поверхности при использовании многошагового метода фазовой триангуляции с пространственной модуляцией оптического излучения. Предложенный метод расшифровки на основе метода расшифровки фазовых изображений с использованием гармонической регрессии и фильтрацией на основе статистического анализа данных обеспечивает измерение фазы без внесения систематических погрешностей, обусловленных ограниченным динамическим диапазоном фотоприемника.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gorthi S.S., Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? // Optics and Lasers in Engineering, 2010, Vol.48. – p. 133-140.

2. D'Apuzzo N. Overview of 3D surface digitization technologies in Europe // Proc. SPIE, 2006. - pp. 1–13.
3. Zhang S. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 2010. Vol. 48(2), - pp. 149–158.
4. Gruber M., Hausler G. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation // Optik. 1992. Vol. 3. С. 118 – 122.
5. Chen L., Liang C., Nguyen X., Shu Y., Wu H.-W., High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21 (10) 105309.
6. 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.
7. Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. 2016. №1. – С. 17-22.
8. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника, 2015. №5. – С.24-27.
9. Dvoynishnikov S.V., Rakhmanov V.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement, 2019. Vol.145. - pp. 63–70.
10. Lv S., Jiang M., Su C., Zhang L., Zhang F., Sui Q., Jia L. Phase Demodulation Method for Fringe Projection Measurement Based on Improved Variable-Frequency Coded Patterns. // Sensors, 2021. Vol.21, - pp.4463.
11. Двойнишников С. В. Устойчивый метод расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Компьютерная оптика, 2007. Т. 31. № 2. - С. 21–25.

© С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. В. Рахманов, В. О. Зуев, 2022