

03

Восстановление фазы волнового фронта на основе фотометрических и интерференционных измерений

© Г.Г. Левин¹, В.Л. Минаев¹, А.А. Самойленко^{1,¶}, Т.В. Яковлева²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, 119361 Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр „Информатика и управление“ РАН, 119333 Москва, Россия

¶e-mail: asamoilenko@vniiofi.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

В окончательной редакции 05.12.2022 г.

Принята к публикации 10.01.2023 г.

Представлена оригинальная методика точного восстановления фазы волнового фронта при интерферометрических измерениях, основанная на оценке амплитуд сигналов. Искомая фаза рассчитывается из геометрических принципов на основе восстановленных статистическими методами неискаженных значений амплитуд. Представлены как математические основы методики, так и результаты ее проверки с помощью численных экспериментов. Также приведены результаты физической экспериментальной проверки метода. Разработанная методика основана на анализе значения амплитуды оптического сигнала в рамках статистической модели Райса. Предлагаемая методика может быть применена для решения широкого круга научно-технических задач в различных системах локации и связи.

Ключевые слова: интерферометрия, восстановление фазового фронта, статистика Райса.

DOI: 10.21883/OS.2023.02.55020.4412-22

Введение

Восстановление фазы оптического излучения, прошедшего через объект или отраженного от него, всегда играло важную роль в оптических измерениях. Это обусловило широкое применение методов интерферометрии и появление большого количества интерферометров различного типа. Ключевым звеном в этих приборах является расшифровка интерферограмм, т.е. восстановление распределения фазы волнового фронта, несущей информацию об исследуемом объекте. На этом пути получены очень существенные результаты.

Наиболее распространенным способом реконструкции фазы из интерференционных измерений является группа методов фазовых шагов, который основан на регистрации нескольких интерферограмм одного и того же объекта с детерминированным фазовым сдвигом в опорном канале и последующей совместной обработке полученных интерферограмм.

Особенностью методов фазовых шагов является то, что они требуют тщательной калибровки величины сдвига фазы в опорном канале, который приводит к изменению интерференционных полос, так как его значение заложено в расчетные формулы для фазы [1].

В настоящее время появились так называемые самокалибрующиеся алгоритмы, в которых величина фазового сдвига определяется по интерферограммам [2–6]. Как правило, для этого требуется наличие некоторого количества полос — интерферограмм с несущей. Однако в некоторых случаях получение интерферограмм без несущей является единственно возможным или более

предпочтительным вариантом. Например, иногда при использовании низкокогерентных источников получение интерферограмм на несущей является затруднительным, а в схеме интерферометра Физо при исследовании больших оптических деталей желательнее, чтобы пучки шли по одному пути, и поэтому интерферограммы также были без несущей. При раскалибровке фазосдвигателя возникает артефакт в виде „второй гармоники“ — фазовая модуляция, повторяющая интерференционные полосы, но удвоенной частоты [7]. Поэтому актуальной задачей является разработка метода фазовых шагов независимого от калибровки фазосдвигающего устройства и способного работать при малом числе интерференционных полос.

Целью настоящей работы является анализ алгоритма реконструкции распределения фазы, основанный на совместной обработке фотометрических и интерференционных данных без использования детерминированного фазосдвигающего устройства.

Теоретические основы

Рассмотрим процесс интерференции объектного поля

$$E_0(x, y) = A(x, y) \exp[-ik\phi(x, y)],$$

где $k = 2\pi/\lambda$, и опорного поля

$$E_r(x, y) = B(x, y) \exp[-ik\phi(x, y)]$$

в предположении их частичной когерентности с пространственным распределением функции когерентности

$\gamma(x, y)$ [8]. Тогда каноническое уравнение интерферограммы имеет вид

$$I(x, y) = A^2(x, y) + B^2(x, y) + 2A(x, y)B(x, y) \times \cos[k(\varphi(x, y) - \phi(x, y))]\gamma(x, y), \quad (1)$$

где $\gamma(x, y)$ — функция когерентности в плоскости регистрации интерферограммы, определяющая контраст полос.

Из выражения (1) нетрудно получить следующее выражение для разности фаз искомого волнового фронта и известного распределения фаз опорной волны:

$$\varphi(x, y) - \phi(x, y) = (1/k) \arccos \left[\frac{I(x, y) - A^2(x, y) - B^2(x, y)}{2A(x, y)B(x, y)\gamma(x, y)} \right]. \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что для восстановления фазы необходимо решить несколько задач: измерить распределение интенсивностей $A^2(x, y)$, $B^2(x, y)$ и $I(x, y)$, измерить функцию когерентности в плоскости формирования интерферограммы, вычислить функцию \arccos для различных аргументов.

Остановимся подробнее на решении каждой задачи.

Измерение распределения интенсивностей

Из выражения (2) очевидно, что ошибки в определении распределения интенсивностей излучения в каждом канале существенно влияют на реконструкцию фазы, так как функция \arccos при значениях аргумента близких к 1 существенно нелинейна. Для того чтобы определить это влияние, проведем численное моделирование работы алгоритма в условиях шумов.

Процесс формирования „медленных“ составляющих полей E_o и E_r в каждом канале интерферометра при наличии шума можно записать в виде

$$R_{o,r} = E_{o,r} + n \exp(i\varphi),$$

где E — незашумленное (истинное) значение сигнала. Величина E является комплексной, что позволяет учитывать фазу волны при моделировании оптических измерений, n — действительная случайная величина, значение которой подчиняется распределению Рэлея с масштабным параметром σ , φ — случайная фаза, имеющая равномерное распределение в диапазоне от 0 до 2π , индексы o, r относятся к объектной и опорной волнам соответственно. Комплексная величина R использовалась для различных вычислений, в которых имеет значение не только амплитуда, но и фаза волны. Например, для вычисления картины интерференции двух волн. Для вычисления распределения амплитуды r в каждом канале от R брался модуль:

$$r = |R|.$$

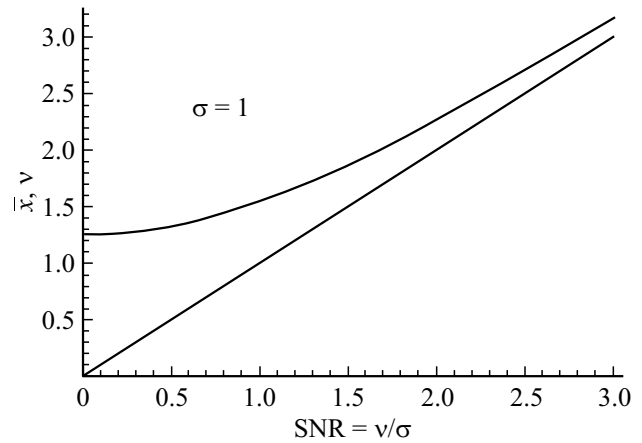


Рис. 1. Иллюстрация несовпадения среднего значения сигнала Райса \bar{x} и параметра Райса ν в зависимости от отношения сигнал/шум, $SNR = \nu/\sigma$.

Для компенсации влияния шумов на измерения распределения интенсивности в каждом канале и интерферограмме необходимо производить усреднение по реализациям. При использовании статистических методов обработки сигналов существенное значение имеют особенности распределения, которому подчиняются анализируемые данные.

Как известно, амплитуда сигнала, сформированного в результате воздействия гауссова шума на исходно детерминированный сигнал, представляет собой случайную величину, которая подчиняется статистическому распределению Райса [9].

В задачах райсовского анализа сигналов измеряемой величиной является амплитуда $x = \sqrt{x_{Re}^2 + x_{Im}^2}$ комплексной переменной с действительной x_{Re} и мнимой x_{Im} составляющими, характеризуемая своим средним значением и искаженная нормально распределенным гауссовым шумом с дисперсией σ^2 . Эти условия характеризуют многие задачи обработки сигналов различной физической природы. Амплитуда $x = \sqrt{x_{Re}^2 + x_{Im}^2}$ подчиняется распределению Райса с функцией плотности вероятности

$$P(x|\nu, \sigma^2) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + \nu^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right),$$

где $I_\alpha(z)$ — модифицированная функция Бесселя первого типа порядка α . Решаемая задача состоит в определении неизвестных параметров ν и σ^2 на основании данных, полученных в результате измерений.

В силу специфических особенностей статистического распределения Райса анализ данных Райса требует разработки специфических методов и соответствующего математического аппарата. А именно, как известно, при обработке гауссовых данных традиционным средством фильтрации является усреднение данных. Однако, как было замечено выше, в отличие от случая гауссова

распределения среднее значение сигнала Райса \bar{x} не совпадает с требуемым значением полезного сигнала ν . Это показано на рис. 1, где среднее значение райсовского сигнала \bar{x} изображено кривой линией, а истинное значение сигнала изображено прямой линией, идущей от начала координат. Среднее значение сигнала Райса как функции параметров Райса выражается следующей формулой:

$$\bar{x} = \sigma \sqrt{\pi/2} I_{1/2}(-\nu^2/2\sigma^2).$$

В (2) $L_{1/2}(z)$ — многочлен Лагерра.

Графики на рис. 1 соответствуют фиксированным значениям параметра шума σ : $\sigma = 1$, поэтому значения по оси абсцисс соответствуют отношению сигнал/шум.

Таким образом, если к данным, подчиненным статистике Райса, применить традиционные методы фильтрации усреднением, то в области малых значений отношения сигнал/шум происходит искажение истинных значений сигнала.

Наличие такой погрешности при усреднении райсовских данных строго обосновано в работах [10–16]. Наличие неизбежной погрешности означает неприменимость простого усреднения для корректного решения задачи и необходимость применения методов обработки данных, учитывающих особенности статистической модели Райса.

В [10–16] была разработана точная теория статистической обработки сигналов Райса и строго обоснованы новые математические методы для так называемого двухпараметрического подхода к анализу данных Райса. Этот подход предполагает решение задачи анализа райсовских данных путем совместной оценки сигнала и шума.

Конкретные теоретические методы, разработанные в рамках двухпараметрического анализа сигнала Райса в [14–16], отличаются базовыми статистическими принципами, на которых они основаны. Один из таких теоретических приемов предполагает применение метода моментов. Эта методика основана на обработке измеренных данных для 2-го и 4-го моментов и обозначена как ММ24.

Решение задачи двухпараметрического анализа сигнала Райса методом ММ24 основано на известных формулах для 2-го и 4-го начальных моментов случайной величины Райса [17]:

$$\begin{cases} \overline{x^2} = 2\sigma^2 + \nu^2, \\ \overline{x^4} = 8\sigma^4 + 8\sigma^2\nu^2 + \nu^4. \end{cases} \quad (3)$$

Рассматривая формулы (3) как систему двух уравнений для двух неизвестных переменных A и σ^2 , можно вычислить искомые значения ν и σ^2 на основе данных для второго $\overline{x^2}$ и четвертого $\overline{x^4}$ моментов райсовской величины x , полученных в результате выборочных измерений [16,18].

Из формул (3) для определения искомых райсовских параметров A и σ^2 нетрудно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} A^2 &= \overline{x^2} \sqrt{1-t}, \\ \sigma^2 &= \frac{\overline{x^2}}{2} (1 - \sqrt{1-t}). \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (4) введено обозначение

$$t = \frac{\overline{x^4}}{(\overline{x^2})^2} - 1.$$

Нетрудно видеть, что для любой случайной величины x в силу стохастичности величины x^2 выполняется условие $\overline{x^4} - (\overline{x^2})^2 > 0$, так как разность $\overline{x^4} - (\overline{x^2})^2$ определяет дисперсию случайной величины x^2 . Поэтому введенный параметр t растет с ростом стохастичности процесса и удовлетворяет соотношению $0 < t \leq 1$. Предельный случай $t = 1$ соответствует частному случаю распределения Райса — распределению Рэлея, когда присутствует шум, а полезный сигнал отсутствует ($A = 0$).

Таким образом, метод ММ24 позволяет совместно рассчитать по формулам (4) как искомую оценку значения сигнала A , так и дисперсию шума σ^2 , что важно для последующей обработки изображений.

Эффективность статистического анализа данных методом ММ24 для оптических фазовых измерений обоснована, в частности, в работе [19].

Результаты численных экспериментов

Используя для обработки интерференционных и фотометрических измерений метод ММ24, было проведено моделирование восстановления профиля фазовой ступеньки. Результаты восстановления приведены на рис. 2. На верхнем графике приведены результаты измерений отдельно объектной волны, отдельно опорной волны и результата их интерференции. При этом

- истинное значение объектной волны имело амплитуду 3 (в условных единицах) и фазу $\phi_{ob} = \pi/4$ от 1-го до 200-го пикселя, а от 201-го до 400-го пикселя фаза была равна $\phi_{ob} + \phi_h$, где ϕ_h — высота фазовой ступеньки, соответствующая 20 nm при длине волны 600 nm;
- истинное значение опорной волны имело всюду амплитуду 2 и фазу 0;
- интерференционная волна представляла собой сумму зашумленных объектной и опорной волн;
- уровень шума для объектной и опорной волн был одинаков и составлял $\sigma = 1$;
- усреднение для интерферограммы выполнялось по 256 реализациям. Для объектной и опорной волн усреднение выполнялось по 256 случайным выборкам одной реализации, так как искомая амплитуда поля была везде одинаковой. В реальном эксперименте, как правило, интерферометр настраивается таким образом, чтобы

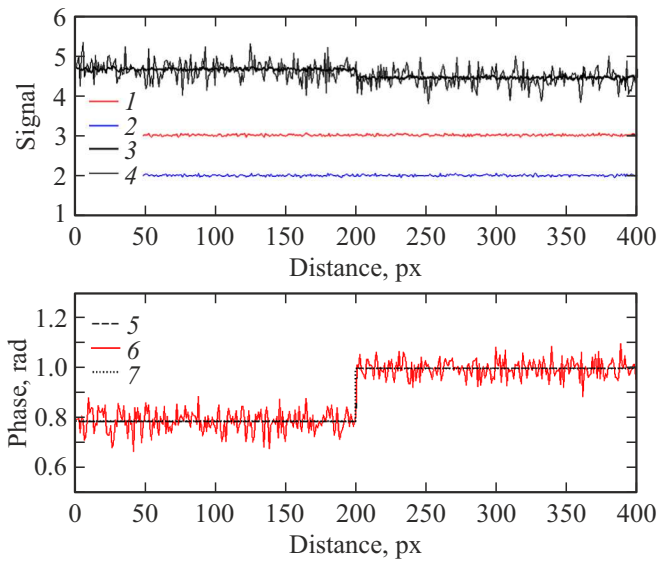


Рис. 2. Моделирование восстановления профиля фазовой ступеньки с использованием метода MM24 для обработки интерференционных и фотометрических измерений. 1 — объектная волна, усредненная; 2 — опорная волна, усредненная; 3 — интерференционная волна, усредненная; 4 — интерференционная волна, единичная реализация; 5 — истинное значение; 6 — сигнал, восстановленный по Райсу; 7 — средний уровень сигнала по Райсу.

амплитуды поля в опорном и сигнальном каналах были одинаковыми и равномерными по всему полю зрения прибора, поэтому такая процедура также возможна.

На нижнем графике приведены результаты восстановления фазовой ступеньки по измерениям, усредненным с помощью метода MM24.

Восстановление фазы с использованием обычного усреднения приводит не только к смещению всего фазового фронта, но и к изменению фазы, которое зависит от уровня шума и собственно ее значения.

На рис. 3 приведены результаты моделирования восстановления фазовой ступеньки при различных значениях параметра шума σ . Высота ступеньки 20 nm. Число реализаций 1000. Остальные параметры те же. На верхнем графике показаны зависимости восстановленных значений верхних и нижних уровней ступеньки от уровня шума. На нижнем графике приведена зависимость оценки высоты ступеньки, деленная на ее истинную высоту, также от уровня шума на измеренных данных. Из графиков видно, что в отличие от метода MM24 оценка обычным усреднением дает искаженные значения. Однако при малом отношении сигнал/шум увеличивается погрешность восстановления при использовании метода MM24. Это вызвано тем, что начиная с $\sigma \approx 1.5$ в данном методе для некоторых точек в формулах возникают отрицательные значения под корнем в выражении (4). Такие точки исключались из усреднения, что приводило к искажениям.

Таким образом, усреднение экспериментальных данных с использованием статистики Райса позволяет восстановить истинное значение фазы поля по фотометрическим и интерференционным данным при любом отношении сигнал/шум.

Измерение распределения функции когерентности по видности полос на интерферограмме

Вторым фактором, влияющим на точность измерения фазы предлагаемым методом, является пространственная неоднородность функции когерентности в области формирования интерферограмм. Это обусловлено тем, что в современных интерферометрах используются источники излучения с частичной когерентностью. На рис. 4, а представлена интерферограмма, полученная с помощью интерференционного микроскопа с низкокогерентным источником [1]. В качестве источника света в микроскопе использовался светодиод (модель M530L3 фирмы ThorLabs) с длиной волны 530 nm. Как видно из рисунка, видность полос различается по полю изображения. Следовательно, необходимо определить коэффициент когерентности, который будет различным в разных точках интерферограммы. Для компенсации влияния неравномерности контраста полос была разработана двухэтапная процедура определения распределения функции когерентности по полю изображения, основанная на обработке интерферограммы плоской поверхности. На первом этапе в каждой строчке изображения были определены наборы локальных максимумов и минимумов. Максимумы и минимумы были аппроксимированы двумерными полиномами четвертого порядка.

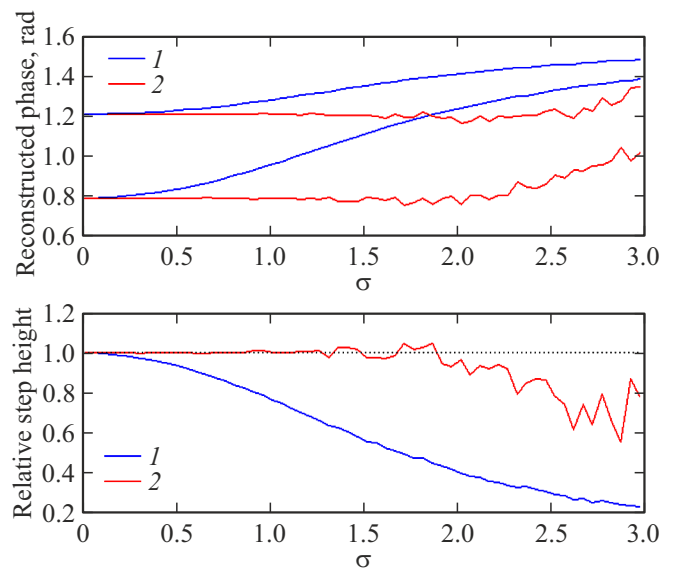


Рис. 3. Результаты моделирования восстановления фазовой ступеньки при различных значениях параметра шума. 1 — простое усреднение, 2 — усреднение по Райсу.

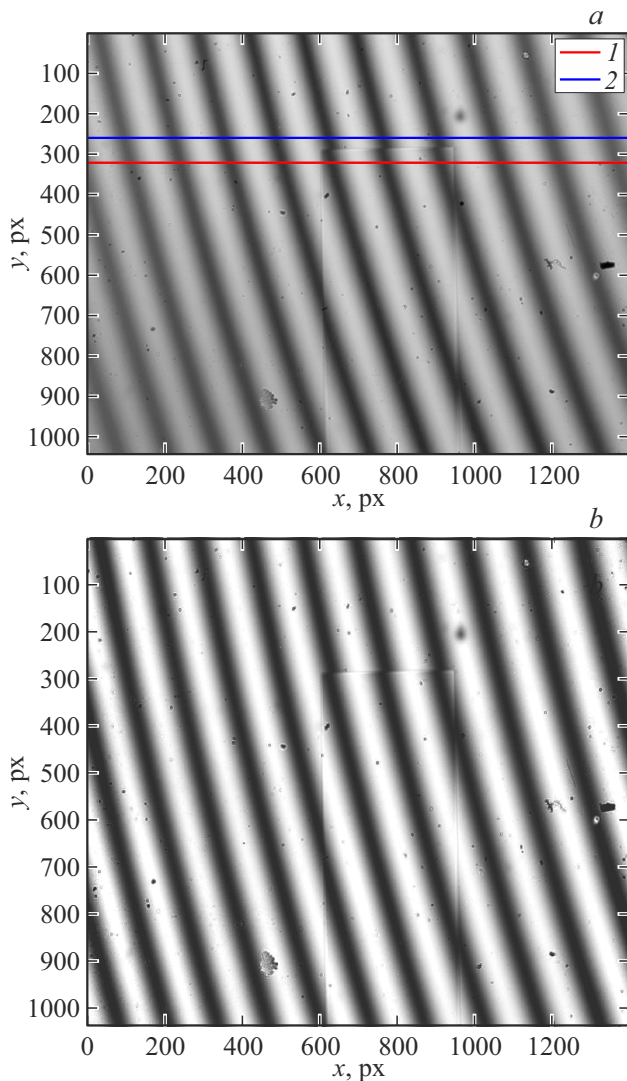


Рис. 4. Интерферограмма, полученная с помощью интерференционного микроскопа (*a*); та же интерферограмма, нормированная на функцию когерентности (*b*). 1 — ступенька, 2 — база.

В результате были получены две гладких поверхности, огибающих интерферограмму сверху и снизу. Далее, интерферограмма была нормирована с помощью этих двух поверхностей таким образом, чтобы минимуму соответствовало значение -1 , а максимуму — $+1$.

На втором этапе нормировки использовались кубические сплайны, проведенные по максимумам и минимумам. Чтобы снизить влияние шумов на результат, вначале данные строки были пропущены через низкочастотный фильтр. Такая процедура позволила практически полностью исключить неравномерность функции когерентности по всему полю зрения интерферометра. На рис. 4, *b* представлена интерферограмма, нормированная на функцию когерентности. Таким образом, использование предлагаемого алгоритма требует при настройке интерферометра предварительного измерения

такой характеристики как распределение функции когерентности в плоскости регистрации интерферограммы.

Вычисление фазы поля

Согласно выражению (2), для вычисления фазы необходимо вычислить функцию \arccos от значений, полученных после обработки фотометрических и интерференционных данных. Данная функция определена в диапазоне от -1 до 1 и линейна при значениях аргумента в районе нуля. Однако при приближении к границам диапазона ее производная стремится к бесконечности. Поэтому в условиях наличия шумов происходит значительное усиление шума восстановленной фазы при значениях аргумента близких к ± 1 . В настоящей работе для компенсации этого эффекта предлагается регистрация еще одной интерферограммы со сдвигом фазы опорного канала приблизительно на четверть длины волны. В этом случае та часть распределения фазы, где аргумент \arccos первой интерферограммы имеет значения в районе нуля, будет восстановлена по первой интерферограмме, а другая часть распределения — по второй интерферограмме. Нетрудно заметить, что при этом не надо знать величину сдвига фазы в опорном канале, так как она легко вычисляется по разности фаз в перекрывающихся областях аргумента.

Экспериментальные результаты

Для проверки предложенного метода был проведен физический эксперимент по восстановлению формы ступеньки меры SHS-180 QC производства VLSI Standards Inc., США. Аттестованная высота ступеньки 19.9 ± 0.8 nm. Измерения производились с помощью интерференционного микроскопа с низкокогерентным источником [1]. В данном микроскопе реализована схема Линника с опорным зеркалом, установленным на пьезоэлементе. Таким образом, можно задавать требуемое смещение опорного зеркала.

С помощью микроскопа были получены картина интерференции между изображениями ступеньки и опорного зеркала (интерферограмма), изображение ступеньки без интерференции (с перекрытым опорным каналом) и изображение опорного зеркала (с перекрытым объектным каналом). Изображения каждого типа были получены сериями по 9 изображений с последующим усреднением по методу MM24. Кроме того, было получено две интерференционные картины, отличающиеся друг от друга фазой интерференционных полос приблизительно на $\pi/2$.

В качестве источника света в микроскопе использовался светодиод (модель M530L3 фирмы ThorLabs) с длиной волны 530 nm.

Пример полученной интерферограммы приведен на рис. 4. Как видно из рисунка, из-за неравномерности функции когерентности контраст полос различается

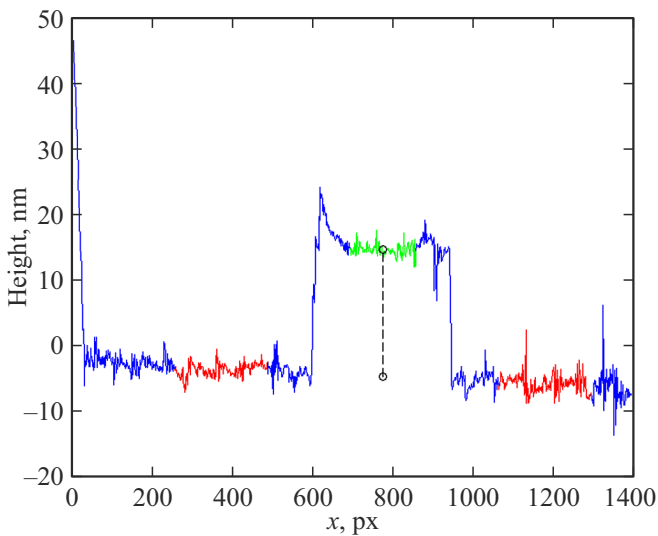


Рис. 5. Восстановленный профиль ступеньки с вычитенной базой и результат измерения высоты.

по полю изображения. Предварительно распределение функции когерентности по полю изображения было определено по изложенной выше методике. Распределение фазы вычислялось вдоль двух линий, одна из которых пересекала ступеньку, другая проходила вне ее. Это необходимо для того, чтобы определить базовую линию, характеризующую aberrации оптики и общий наклон плоскости.

Высота из набега фазы в единицы длины пересчитывалась по формуле

$$h_{nm} = \frac{h_{rad}}{4\pi} \lambda,$$

где λ — длина волны светодиода 530 nm, а 4 вместо 2 стоит потому, что при получении изображения свет делает два прохода.

В результате вычитания базы из ступеньки получилась визуально прямая ступенька. Согласно методике, применяемой для калибровке профилометра ZYGO [20], для вычисления высоты ступеньки необходимо рассчитать среднюю высоту двух участков, находящихся по разные стороны от ступеньки, а также среднюю высоту участка профиля, находящегося на ступеньке, при этом необходимо отступить от ее края, так как там присутствуют резкие скачки фазы из-за дифракции на краю. Высотой ступеньки будет разность этих двух значений.

Поскольку при восстановлении профилей из них вычитался наклон (из каждого профиля свой), результирующая ступенька тоже имеет небольшой наклон. Для устранения влияния этого наклона на результат участки для усреднения на основании брались симметричными относительно участка на ступеньке таким образом, чтобы „центр масс“ участков подложки оказался под „центром масс“ участка ступеньки.

Ступенька с вычитенной базой и результат измерения высоты ступеньки приведены на рис. 5. Красным и зе-

лым выделены участки усреднения, штриховым отрезком показана вычисленная высота ступеньки. Измеренная высота ступеньки составила 19.29 nm, что хорошо согласуется с ее аттестованной высотой 19.9 ± 0.8 nm.

Выводы

Математическое моделирование и экспериментальные результаты показывают, что совместная обработка фотометрических и интерференционных измерений по предложенному в настоящей работе алгоритму позволяет восстанавливать распределение фазы с достаточно высокой точностью даже в присутствии шумов. При этом существенно снижаются требования к фазосдвигающему устройству. Однако при этом выдвигаются серьезные требования к предварительной калибровке интерферометра по пространственному распределению функции когерентности. Другим требованием, которое выдвигает предлагаемый алгоритм, можно назвать равномерность распределения интенсивности в опорном и сигнальном каналах интерферометра. Это существенно упрощает обработку фотометрических данных, так как позволяет использовать райсовские методы анализа данных усреднения распределений амплитуд объектного и опорного каналов по одному кадру при случайной выборке отсчетов.

Список литературы

- [1] V. Minaev, G. Vishnyakov, G. Levin. *Instruments and Experimental Techniques*, **61** (6), 856 (2018). DOI: 10.1134/S0020441218060210
- [2] K. Larkin. *Optics Express*, **9** (5), 236 (2001). DOI: 10.1364/OE.9.000236
- [3] H. Du, J. Yan, J. Wang. *Appl. Optics*, **56** (11), 3071 (2017). DOI: 10.1364/AO.56.003071
- [4] K. Yatabe, K. Ishikawa, Y. Oikawa. *J. Opt. Soc. Am. A*, **34** (1), 87 (2017). DOI: 10.1364/JOSAA.34.000087
- [5] H. Guo, Z. Zhang. *Appl. Optics*, **52** (26), 6572 (2013). DOI: 10.1364/AO.52.006572
- [6] G. Vishnyakov, G. Levin, V. Minaev, N. Nekrasov. *Appl. Optics*, **54** (15), 4797 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.004797
- [7] Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина. *Опт. и спектр.*, **115** (6), 1039 (2013). [G.N. Vishnyakov, G.G. Levin, V.L. Minaev, I.Yu. Tsel'mina *Opt. Spectrosc.*, **115**, 931–937 (2013). DOI: 10.1134/S0030400X13120217].
- [8] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973).
- [9] S.O. Rice. *Bell Syst. Technological J.*, **23** (3), 282 (1944). DOI: 10.1002/j.1538-7305.1944.tb00874.x
- [10] Т.В. Яковлева. *Теория обработки сигналов в условиях распределения Райса* (Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, М., 2015), с. 268.
- [11] T. Yakovleva. *J. Appl. Mathematics and Physics*, **7** (11), 2767 (2019). DOI: 10.4236/jamp.2019.711190
- [12] Т.В. Яковлева. *Компьютерные исследования и моделирование*, **8** (3), 445 (2016). DOI: 10.20537/2076-7633-2016-8-3-445-473

- [13] T. Yakovleva. Appl. and Computational Mathematics, **7** (4), 188 (2018). DOI: 10.11648/j.acm.20180704.12
- [14] T.V. Yakovleva. Computer Research and Modeling, **6** (1), 13 (2014). DOI: 10.20537/2076-7633-2014-6-1-13-25
- [15] T.V. Yakovleva. Computer Research and Modeling, **6** (2), 231 (2014). DOI: 10.20537/2076-7633-2014-6-2-231-244
- [16] Т.В. Яковлева, Н.С. Кульберг. ДАН, сер. Математика, **459** (1), 27-31 (2014).
- [17] J.H. Park, Jr. Q. Appl. Math., **19** (1), 45 (1961).
- [18] Т.В. Яковлева, Н.С. Кульберг. *Способ двухпараметрического анализа случайных сигналов на основе измеренных данных для 2-го и 4-го моментов*. Патент на изобретение № 2556318 (2015).
- [19] Т.В. Яковлева. Компьютерная оптика, **41** (6), 950 (2017). DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-950-956
- [20] Zygo Corporation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zygo.com/>