

УДК 535.31

РАСТРОВЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

И. Е. Кожеватов, С. Е. Стукачев

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложен метод регистрации оптического волнового поля, основанный на модуляции его углового спектра при помощи амплитудной маски. Показано, что новый метод обеспечивает высокие пространственное и угловое разрешения. Разработаны оптическая схема, реализующая метод, и алгоритм восстановления фазы волнового поля по данным измерений. Проведено компьютерное моделирование основанного на предложенном методе эксперимента по регистрации волнового поля.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения широкого круга исследовательских и прикладных задач современной физики необходимо измерение профиля фазы световой волны. Это задачи видения (контроль оптических деталей и исследование фазовых объектов), построение объёмных изображений, проблемы медицины, адаптивной оптики, формирование цифровых изображений [1].

За прошедшие годы были предложены разнообразные методы, позволяющие качественно оценивать и измерять профиль волнового фронта. Наиболее известными являются интерферометрические устройства, использующие когерентное сложение волн, и датчики на основе метода Гартмана [2] (датчик Шака—Гартмана [3], сканирующий датчик Гартмана [4, 5]).

Наибольшей точности в измерении фазы световых полей удалось достичь при помощи интерферометрических методов [2]. Однако принципиальное требование наличия когерентной опорной волны, к сожалению, делает эти методы неприменимыми для решения многих практических задач.

В 1904 году немецкий учёный Иоганн Гартман разработал метод измерения наклона волнового фронта, не требующий опорной волны [2]. Метод основан на законах геометрической оптики. Исследуемый волновой фронт падает на непрозрачный экран с набором отверстий — диафрагму Гартмана. Фокусировка излучения, прошедшего через каждое отверстие, при помощи линзы (так называемой линзы Гартмана) позволяет определить наклон волнового фронта в рассматриваемой точке по положению светящегося пятна в фокальной плоскости линзы. Метод Гартмана широко применяется для контроля оптических деталей, в частности крупногабаритной астрономической оптики.

Основной недостаток метода Гартмана заключается в строгом ограничении пространственного и углового разрешений. Во-первых, не представляется возможным зарегистрировать изменения фазы, пространственный масштаб которых меньше расстояния между отверстиями [6]. Во-вторых, возникает взаимное ограничение углового и пространственного разрешений, связанное с дифракционными эффектами на отверстиях диафрагмы.

Одной из важнейших модификаций метода Гартмана является датчик Шака—Гартмана, в котором вместо диафрагмы используется растр из микролинз [3]. Пространственное разрешение датчика соответствует размеру микролинз, однако ограничения, связанные с дифракцией, по-прежнему остаются. Кроме того, динамический диапазон датчика ограничен апертурами микролинз.

И. Е. Кожеватов, С. Е. Стукачев

287

Другой путь развития метода Гартмана заключается в создании сканирующих датчиков [5]. Вместо диафрагмы Гартмана используется экран с одним отверстием, при помощи которого проводятся последовательные измерения наклона волнового фронта в каждой точке апертуры исследуемого светового пучка. Сканирующий датчик Гартмана также имеет принципиальное ограничение пространственного и углового разрешений, однако использование алгоритмов восстановления волнового фронта, основанных на определении «центров тяжести» дифракционных пятен, позволяет существенно повысить точность восстановления профиля фазы. Кроме того, сканирующий датчик имеет существенно более высокий динамический диапазон по сравнению с датчиком Шака—Гартмана.

Серьёзный недостаток сканирующего датчика заключается в необходимости проводить большое количество последовательных измерений, число которых соответствует числу точек апертуры светового пучка, в которых мы хотим определить наклон фазового фронта.

Представляет интерес разработка такой модификации метода Гартмана, которая сохранит достоинства сканирующего датчика и позволит сократить число измерений, необходимое для восстановления фазового фронта.

В настоящей работе изложены основные положения растрового метода регистрации волновых полей, представляющего собой дальнейшее развитие метода Гартмана. Идея метода во многом аналогична принципам, на которых основана работа сканирующего датчика, однако в данном случае сканирование производится не по апертуре исследуемого пучка, а по элементам его углового спектра. Показано, что во многих случаях это позволяет существенно сократить число измерений. Кроме того, вместо экрана с одним отверстием предлагается использовать амплитудную маску, представляющую собой квадратный растр с расположенными определённым образом открытыми и закрытыми участками. В работе представлена оптическая схема, реализующая данный метод, приведено решение обратной задачи восстановления фазового фронта и теоретическое исследование пространственного и углового разрешения метода. Представлены результаты численного моделирования эксперимента по регистрации фазы световой волны растровым методом.

1. СКАНИРОВАНИЕ УГЛОВОГО СПЕКТРА ОТВЕРСТИЕМ

В данном разделе описан метод регистрации фазового фронта световой волны, основанный на сканировании углового спектра волны при помощи экрана с отверстием.

Оптическая схема, реализующая метод (рис. 1), состоит из конфокальной системы линз L_1 и L_2 , экрана M с отверстием и матричного приёмника S . Ось z декартовой системы координат

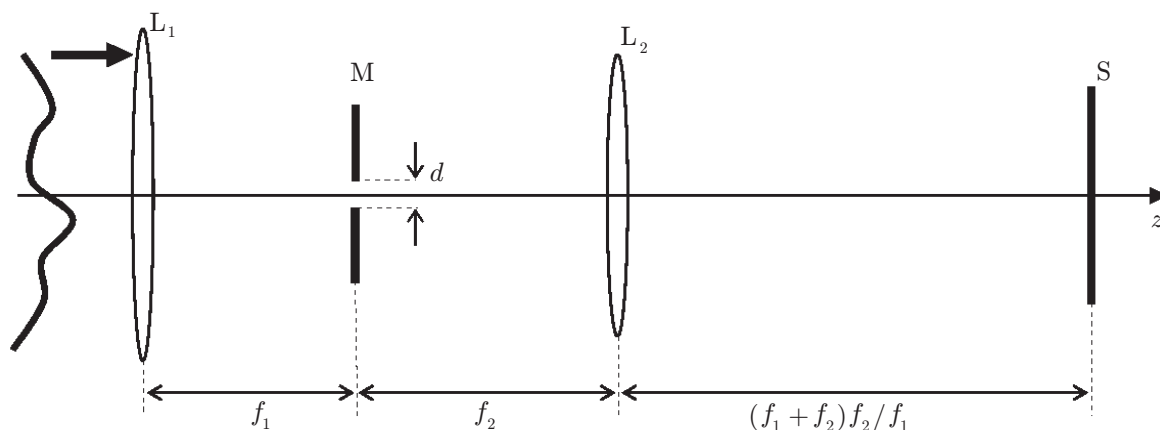


Рис. 1. Оптическая схема, реализующая метод сканирования углового спектра отверстием: L_1 и L_2 — линзы, M — экран с отверстием, S — матричный приёмник

совпадает с оптической осью системы, x и y — координаты в плоскости $z = 0$.

Световая волна, фазовый фронт которой $W(x, y)$ требуется измерить, падает на расположенную в плоскости $z = 0$ линзу L_1 с фокусным расстоянием f_1 . В фокальной плоскости линзы L_1 помещён экран M с отверстием. Пройдя через отверстие, излучение попадает на линзу L_2 с фокусным расстоянием f_2 , переносящую изображение из плоскости линзы L_1 в плоскость с координатой $z_s = (1 + f_2/f_1)(f_1 + f_2)$, в которой расположен матричный приёмник S .

Распределение интенсивности волнового поля в фокальной плоскости $z = f_1$ соответствует угловому спектру пучка, падающего на линзу L_1 [7]. Приближение, на котором основан метод сканирования углового спектра, как и метод Гартмана, заключается в том, что каждому наклону волнового фронта $\theta(x, y)$ в плоскости $z = 0$ ставится в соответствие определённая точка фокальной плоскости линзы Гартмана. Если в фокальной плоскости помещён экран с отверстием, то линза L_2 строит изображение тех точек волнового пучка, в которых наклон фазового фронта соответствует открытому участку фокальной плоскости. Перемещая экран в фокальной плоскости и сканируя таким образом угловой спектр световой волны, мы можем установить соответствие между локальными наклонами волнового фронта и точками апертуры исследуемого пучка.

Угловое разрешение метода определяется размером d отверстия в экране:

$$\Delta\theta = d/f_1. \quad (1)$$

Динамический диапазон определяется размером D_f апертуры фокальной плоскости, по которой проводится сканирование. Максимальное значение угла наклона, которое может быть зарегистрировано, равно

$$\theta_{\max} = \arcsin[D_f/(2f_1)].$$

Число сдвигов экрана и соответствующих измерений равно количеству наклонов волнового фронта, которое необходимо разрешить:

$$N = \left(\frac{2\theta_{\max}}{\Delta\theta} \right)^2.$$

Приближённая оценка даёт

$$N \sim (D_f/d)^2.$$

Для большинства практических задач это число существенно меньше, чем количество точек на апертуре световой волны, для которых измеряется наклон профиля фазы при использовании сканирующего датчика Гартмана.

Пространственное разрешение метода определяется шириной углового спектра, прошедшего через отверстие:

$$\Delta x_f \gtrsim \lambda f_2/d,$$

где λ — длина волны. Поскольку система линз L_1 и L_2 строит изображение исходного пучка в масштабе, равном отношению фокусных расстояний f_2/f_1 , то на самом деле полученная оценка для пространственного разрешения должна быть умножена на коэффициент f_1/f_2 . Окончательно имеем

$$\Delta x_f \gtrsim \lambda \frac{f_1}{d}. \quad (2)$$

Заметим, что для произведения углового и пространственного разрешений метода справедливо неравенство

$$\Delta x \Delta\theta \gtrsim \lambda.$$

Таким образом, сканирование в плоскости углового спектра оставляет взаимное ограничение пространственного и углового разрешений неизменным, но позволяет существенно уменьшить

число измерений в случае, когда количество разрешаемых точек на апертуре волнового фронта превышает количество разрешаемых точек по углу.

Обратная задача восстановления профиля фазы по локальным наклонам волнового фронта в дискретном наборе точек имеет тот же вид, что и для метода Гартмана. Для её решения разработано большое количество алгоритмов. Наиболее удобным и универсальным из них является интегрирование по формуле трапеции [2].

2. ОПИСАНИЕ РАСТРОВОГО МЕТОДА

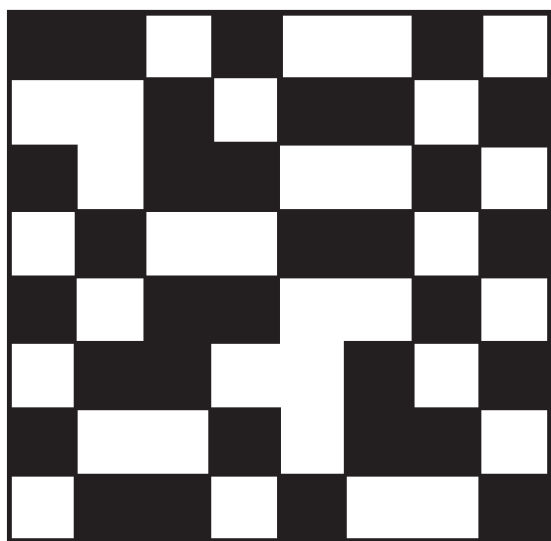


Рис. 2. Фрагмент амплитудной маски

Предложен растровый метод регистрации оптического волнового поля, представляющий собой дальнейшее развитие метода сканирования углового спектра отверстием. Модификация заключается в том, что в фокальной плоскости $z = f_1$ (рис. 1) вместо экрана с отверстием помещается амплитудная маска, представляющая собой квадратный растр с расположенными определённым образом открытыми и закрытыми участками. Фрагмент амплитудной маски представлен на рис. 2. Белым цветом изображены прозрачные области, чёрным — области, не пропускающие излучение.

Процедура измерения фазового фронта включает в себя последовательные смещения амплитудной маски на расстояние, равное размеру d одного элемента растра, и регистрацию изображения в плоскости $z = z_S$ для каждого положения маски. Таким образом, фокальная плоскость $z = f_1$ оказывается разбитой на квадратные участки, соответствующие элементам растра. Каждый из этих участков в ходе измерений будет то открытым, то закрытым. Расположение прозрачных и непрозрачных элементов масок выбирается так, чтобы модуляция каждого участка фокальной плоскости была отлична от других. Интенсивность в каждой точке апертуры приёмника в ходе эксперимента изменяется в соответствии с модуляцией того участка фокальной плоскости, который соответствует наклону фазового фронта в этой точке. Таким образом, результаты измерений позволяют установить соответствие между локальными наклонами волнового фронта и точками апертуры исследуемого пучка.

Введя в фокальной плоскости прямоугольную систему координат (x_f, y_f) , можно каждой точке поставить в соответствие бинарную функцию от номера измерения n — $M(x_f, y_f, n)$. Функция $M(x_f, y_f, n)$ принимает значение 1, если для n -го измерения точка с координатами (x_f, y_f) открыта, и 0, если закрыта. Точкам внутри одного элемента растра соответствует одна и та же функция $M(x_f, y_f, n)$. Поэтому в дальнейшем вместо непрерывных координат (x_f, y_f) будем использовать индексы l и m , обозначающие элемент растра. При этом функция амплитудной маски будет записываться в виде $M_{lm}(n)$. Количество элементов растра N_R соответствует числу разрешаемых наклонов фазового фронта.

Если исследуемое волновое поле некогерентно, то распределение по углам в фокальной плоскости также некоррелировано [8], и для интенсивности в каждой точке плоскости изображения

при некотором положении маски можно записать

$$I(x_S, y_S, z_S, n) = \sum_{l, m} I_{lm}(x_S, y_S, z_S) M_{lm}(n), \quad (3)$$

где суммирование проводится по всем элементам растра, $I_{lm}(x_S, y_S, z_S)$ — распределение интенсивности поля в плоскости изображения в случае, когда открыт только один элемент растра с индексами l и m . По сути, $I_{lm}(x_S, y_S, z_S)$ — та интенсивность, которая измеряется в методе сканирования углового спектра отверстием.

Для каждой фиксированной точки приёмника с координатами x_S, y_S, z_S выражения вида (3) при различных n можно рассматривать как систему уравнений относительно $I_{lm}(x_S, y_S, z_S)$. Система линейных уравнений с N_R неизвестными будет иметь единственное решение в случае, когда количество уравнений также равно N_R . Таким образом, для восстановления волнового фронта нам требуется провести N_R сдвигов маски и соответствующих измерений интенсивности. При этом бинарные функции $M_{lm}(n)$ должны быть линейно независимы. За выполнением последнего условия необходимо следить при разработке амплитудной маски.

Определив из системы уравнений $I_{lm}(x_S, y_S, z_S)$ для каждой точки апертуры приёмника, мы можем восстановить фазовый фронт аналогично тому, как это делается при сканировании углового спектра отверстием.

Таким образом, для растрового метода справедливы те же выражения (1) и (2) для углового и пространственного разрешений, что и для метода сканирования углового спектра отверстием. В данном случае величина d в формулах (1) и (2) соответствует размеру элемента растра. И в том, и в другом методе необходимое количество измерений соответствует числу разрешаемых углов наклона фазы.

Тем не менее, растровый метод обладает рядом преимуществ. В случае, когда амплитуда шума на матричном приёмнике не зависит от интенсивности регистрируемого излучения, как, например, при работе с оптическим излучением инфракрасного диапазона, растровый метод имеет выигрыш Фелжета [9], составляющий $N_R/2$, по сравнению с методом сканирования отверстием. Это связано с тем, что при использовании растрового метода при каждом измерении открыты в среднем $N_R/2$ элементов растра, в то время как метод сканирования отверстием оставляет открытым только один участок углового спектра.

Кроме того, использование растровой амплитудной маски вместо экрана с отверстием позволяет упростить эксперимент по регистрации фазового фронта. Вместо сканирования по двум поперечным координатам в фокальной плоскости требуется только смещение маски в одном направлении.

К недостаткам растрового метода можно отнести то, что он принципиально неприменим для регистрации когерентных полей, однако при работе с некогерентным излучением он имеет ряд преимуществ по сравнению с методом Гартмана.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РЕГИСТРАЦИИ ФАЗЫ ВОЛНОВОГО ПУЧКА

Было проведено численное моделирование эксперимента по регистрации волнового фронта оптического излучения растровым методом, включающее в себя несколько этапов: моделирование распространения волнового пучка через оптическую схему экспериментальной установки (рис. 1), решение системы уравнений (3), определение наклонов волнового фронта в каждой точке апертуры световой волны и последующее вычисление фазы волнового поля.

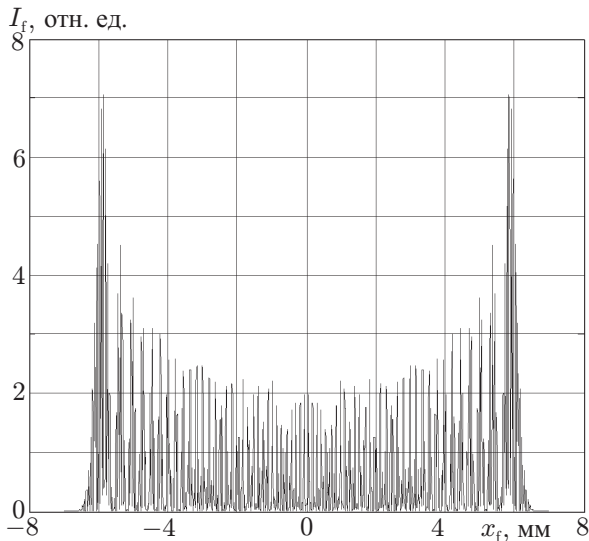


Рис. 3. Распределение интенсивности волнового поля в плоскости $z = f_1$ по координате x_f

При численном моделировании для простоты рассматривалась двумерная задача распространения световой волны.

Вначале проводился расчёт распределения волнового поля в фокальной плоскости. После этого для каждого измерения, которому соответствовало некоторое положение маски с заданным распределением прозрачных и непрозрачных элементов, определялось распределение интенсивности в плоскости изображения $I(x_S, z_S, n)$. Из системы уравнений (3) методом Гаусса определялись значения $I_{lm}(x_S, z_S)$. По положению максимумов распределений $I_{lm}(x_S, z_S)$ определялся наклон волнового фронта в каждой точке. Волновой фронт определялся путём интегрирования функции наклонов фазы методом трапеций.

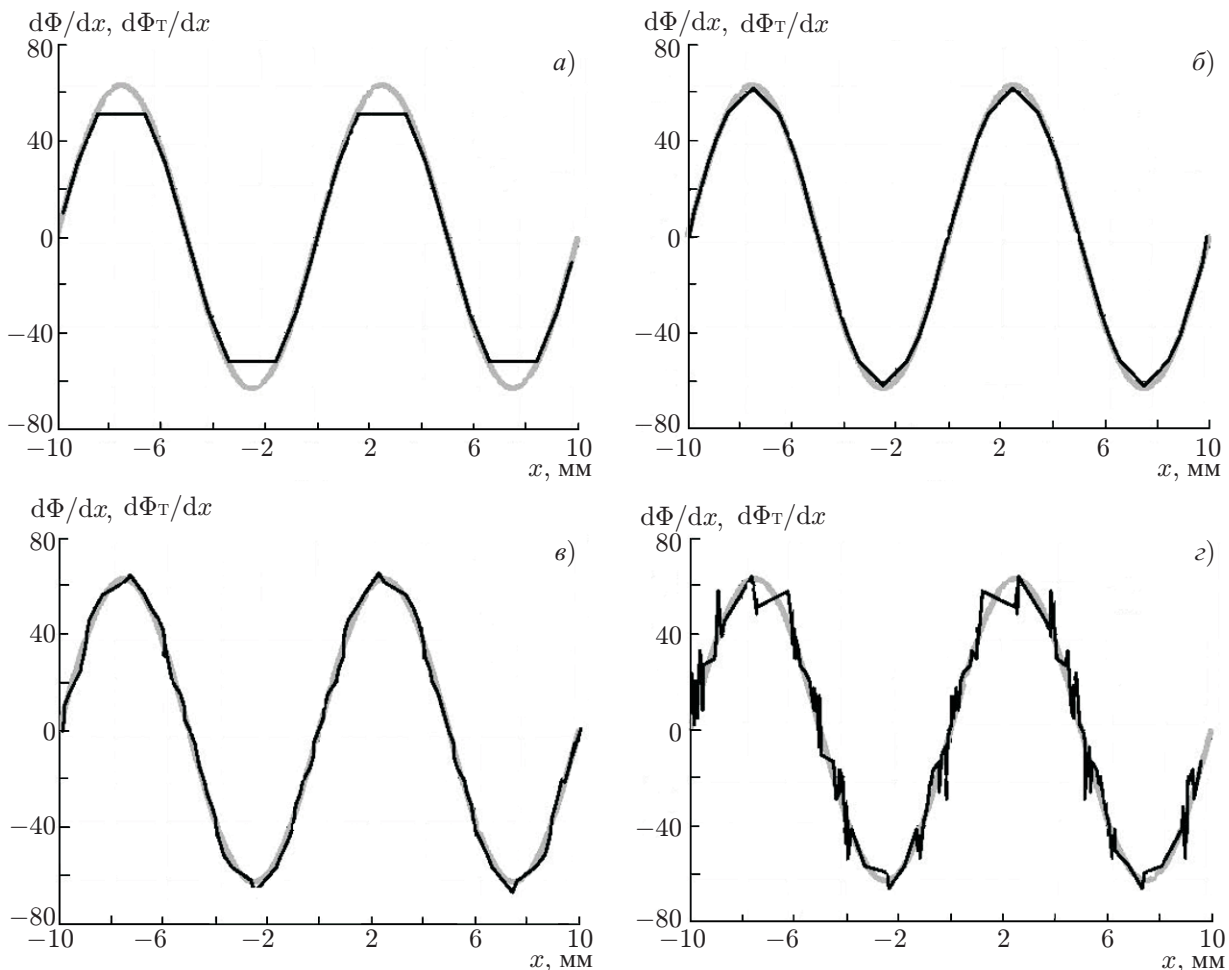


Рис. 4. Сравнение результатов восстановления наклона фазы $\Phi(x)$ (чёрные линии) с производной теоретически заданного распределения $\Phi_T(x)$ (серые линии) при (а) $d = 2$ мм, (б) $d = 1$ мм, (в) $d = 0,5$ мм, (з) $d = 0,25$ мм

Была рассмотрена схема (рис. 1) со следующими параметрами: фокусные расстояния линз составляли $f_1 = f_2 = 1\,000$ мм, размер элемента раstra d брался равным 2; 1; 0,5 и 0,25 мм. Целью компьютерного эксперимента с различными значениями d было продемонстрировать зависимость углового и пространственного разрешений от размера элемента раstra.

В качестве примера был выбран волновой пучок с гауссовым распределением по амплитуде и распределением фазы, имеющим вид косинуса:

$$E_0(x) = A_0 \exp(-x^2/a^2) \exp[iF_0 \cos(2\pi x/D_0)].$$

Значения параметров пучка были выбраны следующими: характерная ширина пучка $a = 20$ мм, амплитуда модуляции фазы $F_0 = 100$, характерный масштаб модуляции фазы $D_0 = 10$ мм. Апертура линзы L_1 бралась равной $D_1 = 2D_0 = 20$ мм. Длина волны излучения $\lambda = 0,61$ мкм.

Распределение интенсивности поля в фокальной плоскости имеет вид, представленный на рис. 3. Апертура фокальной плоскости принималась равной $D_f = 16$ мм.

На рис. 4 представлено сравнение результатов восстановления наклона фазы $d\Phi(x)/dx$ с теоретически заданным распределением фазы $d\Phi_T(x)/dx$ для различных значений d . При $d = 2$ мм отклонение восстановленного распределения наклонов от заданного объясняется недостаточным угловым разрешением. При $d = 0,25$ мм искажения $d\Phi(x)/dx$ связаны с неточностью опреде-

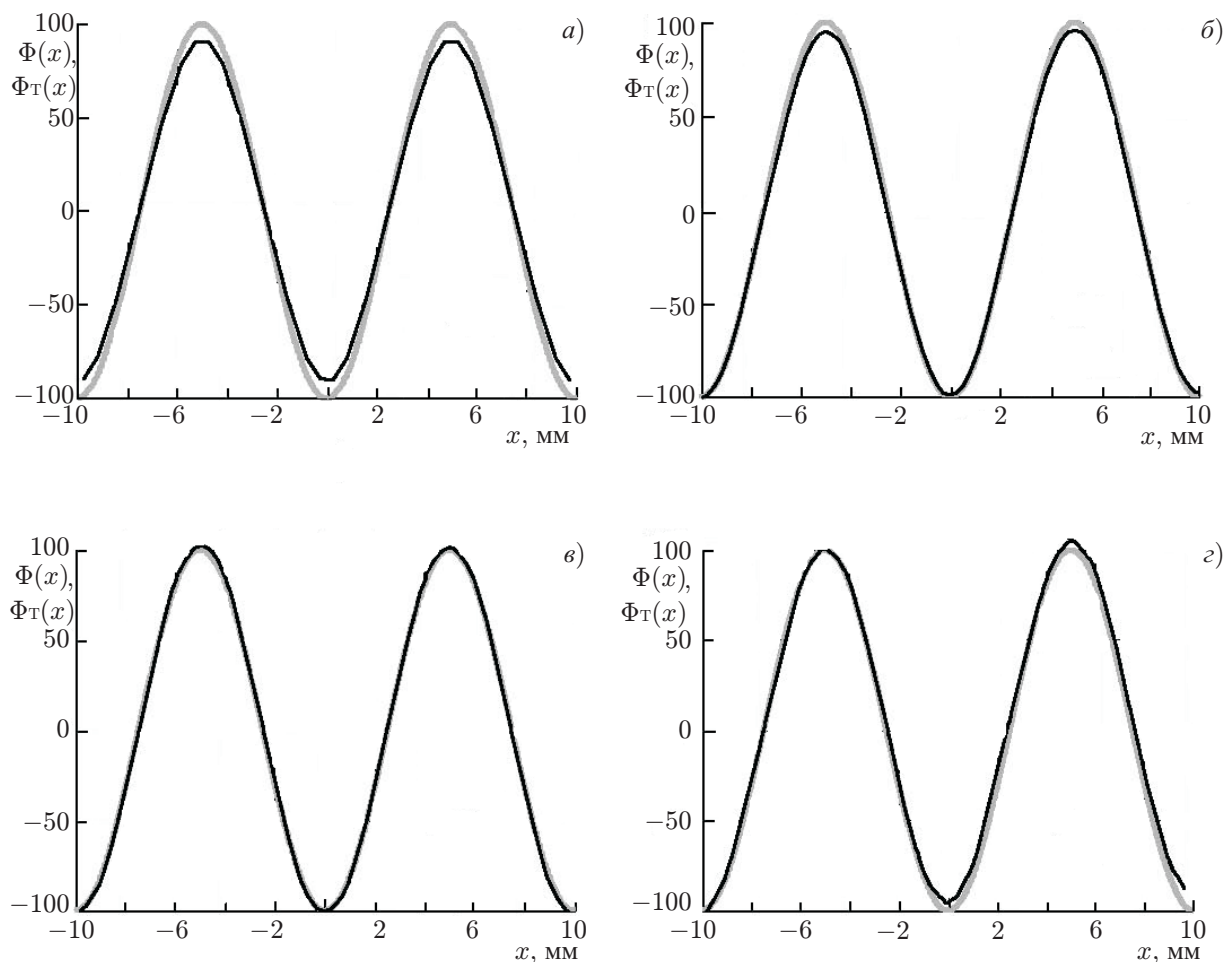


Рис. 5. Сравнение результатов восстановления фазы $\Phi(x)$ (чёрные линии) с теоретически заданным распределением $\Phi_T(x)$ (серые линии) при (а) $d = 2$ мм, (б) $d = 1$ мм, (в) $d = 0,5$ мм, (г) $d = 0,25$ мм

ления максимумов $I_{lm}(x_S, z_S)$, т.е. с недостаточным пространственным разрешением. На рис. 5 представлено сравнение соответствующих восстановленных распределений фазы с заданным распределением. Видно, что при $d = 1$ мм и $d = 0,5$ мм восстановленные при численном моделировании распределения фазы хорошо совпадают с заданным.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают аналитические оценки пространственного и углового разрешений предложенного метода регистрации фазы волнового поля. Хорошее совпадение результатов моделирования с теоретически заданным распределением фазы подтверждает возможность регистрации фазы волнового поля растровым методом при правильном выборе параметров оптической схемы, отвечающих условиям конкретной практической задачи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны основные положения растрового метода регистрации фазы оптических волновых полей. Разработана оптическая схема, реализующая метод, и решена обратная задача восстановления фазы волнового поля. Проведено компьютерное моделирование эксперимента по измерению фазы оптических волновых полей. Результаты моделирования подтвердили оценки, полученные аналитически.

Применение растрового метода позволяет существенно уменьшить число измерений по сравнению со сканирующим датчиком Гартмана в случае, когда количество разрешаемых точек на апертуре волнового фронта превышает количество разрешаемых точек по углу. При этом взаимное ограничение пространственного и углового разрешений остаётся неизменным. Кроме того, при решении ряда практических задач использование растрового метода позволяет получить выигрыш Фелжета.

В настоящее время в ИПФ РАН идёт работа по созданию экспериментального стенда, реализующего растровый метод регистрации оптических волновых полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В. А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
2. Оптический производственный контроль М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
3. Shack R. V., Platt B. C. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 656.
4. Castellini C., Francini F., Tiribilli B. // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 4120.
5. Laude V., Olivier S., Dirson C., Huignard J.-P. // Opt. Lett. 1999. V. 24. P. 1796.
6. Vitrichenko E. A. // Astron. Zhurnal. 1976. V. 53. P. 660.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
8. Зверев В. А. Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике). М.: Сов. радио, 1975. 304 с.
9. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 384 с.

Поступила в редакцию 9 декабря 2009 г.; принята в печать 28 апреля 2010 г.

RASTER METHOD FOR RECORDING OPTICAL WAVE FIELDS*I. E. Kozhevaton and S. E. Stukachev*

A new method for recording the wave field is proposed. The method is based on modulation of the angular spectrum of the field using an amplitude mask. It is shown that the new method ensures high spatial and angular resolutions. An optical scheme for implementing the method and the algorithm for reconstructing the wave-field phase from the measurement data are developed. Computer simulation of the experiment for recording the wave field on the basis of the proposed method is performed.