

УДК 535.42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

*С. Е. Стукачев**, *И. Е. Кожеватов*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработан и экспериментально проверен метод регистрации оптических волновых полей, основанный на дифракции оптического волнового поля на двух дополнительных друг другу экранах. Разработана оптическая схема экспериментальной установки, реализующей данный метод, и порядок эксперимента по измерению фазы оптического волнового поля. Экспериментально исследованы основные характеристики метода, такие как точность и пространственное разрешение. Проведена калибровка разработанной оптической схемы, что позволило устранить систематическую ошибку фазовых измерений, вносимую элементами схемы.

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих исследовательских и прикладных задач современной физики связано с измерением волнового поля оптического излучения. К таким задачам относятся построение объёмных изображений и исследование фазовых объектов, контроль параметров лазерного излучения, проблемы офтальмологии, адаптивной оптики и многие другие [1].

Как известно, основной проблемой при регистрации оптического волнового поля является измерение пространственного распределения фазы световой волны, или, иными словами, волнового фронта [2]. Поскольку устройств, позволяющих непосредственно измерять фазу волнового поля, не существует, то в основе любого метода фазовых измерений лежит некоторое преобразование исходного волнового поля. В результате такого преобразования формируется волновое поле, пространственное распределение интенсивности которого определяется фазовой функцией исходного поля. На сегодняшний день для регистрации фазового фронта чаще всего применяются интерферометрические устройства, использующие когерентное сложение волн [3], датчики Гартмана [3, 4], позволяющие измерять локальный наклон волнового фронта на основе принципов геометрической оптики, а также теневые методы, такие как метод фазового контраста Цернике [5].

Каждый из указанных выше фазометрических методов обладает рядом недостатков, существенно ограничивающих круг решаемых им задач [3]. Это заставляет искать альтернативные подходы к измерению фазы оптических волновых полей, основанные на других физических принципах. В качестве одной из таких альтернатив могут рассматриваться дифракционные методы. Действительно, дифракция является одним из тех явлений, в которых проявляется фазовая структура оптического излучения. Идею дифракционных методов регистрации оптических волновых полей можно сформулировать следующим образом. Рассматривается дифракция оптического поля на одном или нескольких объектах, подобранных таким образом, чтобы результаты измерений интенсивности дифрагированных полей позволяли однозначно и точно восстанавливать интенсивность и фазу исходного волнового поля при минимальном числе измерений. К дифракционным методам можно отнести методы восстановления фазы по измерениям интенсивности в нескольких плоскостях на основе итерационных алгоритмов [6], а также модуляционно-спектральные методы [7].

* sergio_vshopf@mail.ru

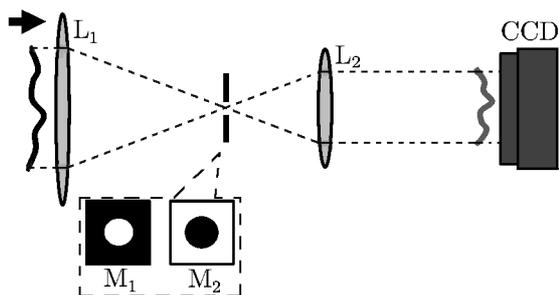


Рис. 1. Оптическая схема, реализующая дифракционный метод регистрации оптических волновых полей: L_1 , L_2 — линзы, M_1 , M_2 — амплитудные маски, CCD — матричный фотоприёмник

в рамках теории дифракции Кирхгофа [2], а также принципом Бабиня, можно получить аналитические выражения для интенсивностей полей, содержащие явную зависимость от фазы светового пучка, падающего на линзу L_1 .

Аналитические расчёты и численные оценки характеристик метода, изложенные авторами в предыдущей работе [8], продемонстрировали, что метод дополнительных экранов позволяет восстанавливать фазу оптического излучения с точностью, сопоставимой с точностью интерферометрических методов.

Данная работа посвящена экспериментальной апробации дифракционного метода. Представлена оптическая схема, реализующая метод, и подробно изложен порядок эксперимента по измерению фазы оптического волнового поля при помощи метода дополнительных экранов. Представлены результаты экспериментального исследования важнейших характеристик метода, таких как точность и пространственное разрешение. Особое внимание уделено решению проблемы калибровки оптической схемы, реализующей метод, поскольку такая калибровка позволяет устранить систематическую ошибку фазовых измерений, вносимую элементами оптической схемы.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Оптическая схема экспериментальной установки, при помощи которой проводилось тестирование дифракционного метода регистрации оптических волновых полей, имеет вид, представленный на рис. 2. Установка может быть условно поделена на две части: первая представляет собой источник тестируемого оптического излучения, а вторая непосредственно измеряет фазу.

Световой пучок, при помощи которого настраивалась установка и экспериментально реализовывался метод дополнительных экранов, создавался при помощи точечного источника излучения S , коллимирующей линзы L_0 и диафрагмы D . Точечный источник представлял собой выход одномодового световода, запитанного с другого конца лазером, работающим на длине волны $\lambda = 650$ нм. Линза L_0 была установлена на трансляторе, позволяющем перемещать её вдоль оптической оси системы и тем самым изменять кривизну волнового фронта измеряемого светового пучка. В ряде экспериментов коллимирующая линза не использовалась: световой пучок создавался при помощи точечного источника, удалённого на большое расстояние от измерительной схемы. Поперечный размер пучка был ограничен диафрагмой D с диаметром апертуры, изменявшимся от 3 до 10 мм.

В предыдущих работах [8, 9] авторами был предложен метод регистрации оптических волновых полей, основанный на дифракции оптического волнового поля на двух дополнительных друг другу экранах — амплитудных масках M_1 и M_2 , которые поочерёдно устанавливаются на пути распространения измеряемого светового пучка [2] (см. рис. 1). Метод дополнительных экранов позволяет восстанавливать фазу волнового поля по результатам трёх измерений интенсивности: интенсивности поля дифракции на маске M_1 , интенсивности поля дифракции на маске M_2 и интенсивности изображения исходного пучка (когда маска не устанавливается). Пользуясь описанием распространения световых пучков

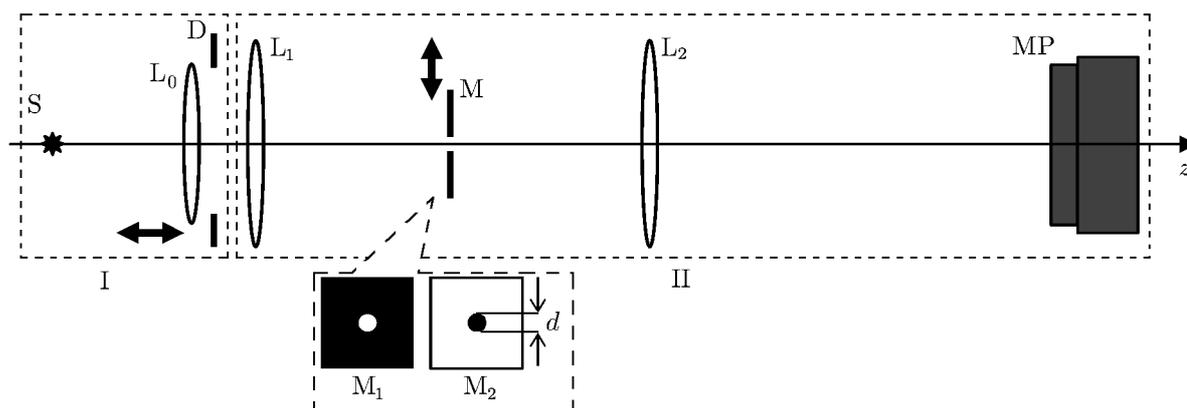


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки, реализующей дифракционный метод регистрации оптических волновых полей: S — точечный источник оптического излучения, D — диафрагма, L_0 , L_1 , L_2 — линзы, M_1 , M_2 — амплитудные маски, МР — матричный фотоприёмник

Вторая часть установки, непосредственно осуществляющая фазовые измерения, состояла из конфокальной системы линз L_1 и L_2 , амплитудной маски (экрана) М и двумерного матричного фотоприёмника МР. Линзы L_1 и L_2 имели одинаковое фокусное расстояние $f = 160$ мм. Амплитудная маска М была установлена на системе трансляторов, позволяющей перемещать её как в общей фокальной плоскости линз L_1 и L_2 , так и вдоль оптической оси системы, и таким образом настраивать её положение. Матричный фотоприёмник МР был установлен так, что линза L_2 переносила на его матрицу изображение исходного светового пучка из плоскости линзы L_1 .

В эксперименте использовались две амплитудные маски M_1 и M_2 в виде прозрачных кварцевых подложек с металлическим напылением, абсолютно непрозрачным в оптическом диапазоне. Напыление было выполнено таким образом, чтобы маски являлись дополнительными друг другу экранами: маска M_1 представляла собой квадратный непрозрачный экран с размерами 20×20 мм с отверстием с диаметром $d = 20$ мкм в центре, маска M_2 — прозрачную квадратную подложку такого же размера, что и маска M_1 , с непрозрачным кружком, диаметр которого равен диаметру отверстия в первой маске (см. рис. 2).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ФАЗЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Как уже говорилось ранее, для измерения фазы оптического волнового поля при помощи метода дополнительных экранов необходимы три различных измерения: измерение интенсивности поля дифракции на маске M_1 , интенсивности поля дифракции на маске M_2 и интенсивности изображения исходного пучка (когда маска не устанавливается). Последовательность измерений была следующей. Вначале амплитудные маски не устанавливались, и измерялось распределение интенсивности исходного светового пучка, падающего на линзу L_1 . Потом устанавливалась маска M_1 , и измерялось распределение интенсивности поля дифракции на ней. Затем маска M_1 удалялась, и устанавливалась маска M_2 таким образом, чтобы непрозрачный кружок в центре маски с высокой степенью точности находился в том же месте, где во время предыдущего измерения находилось отверстие в маске M_1 . После этого измерялось распределение интенсивности поля дифракции на маске M_2 .

Наибольшую трудность при реализации дифракционного метода представляла установка дополнительных экранов в одно и то же место с высокой степенью точности. Для решения этой

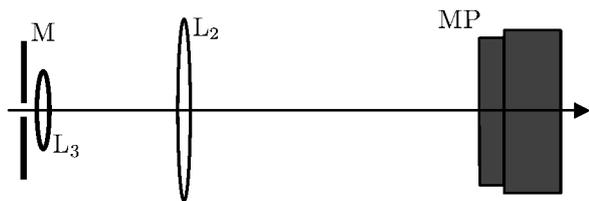


Рис. 3. Оптическая схема для контроля положения амплитудных масок: М — амплитудная маска, L₃ — микроскопный объектив, L₂ — линза, МР — матричный фотоприёмник

проблемы была разработана следующая процедура контроля положения масок. После измерения интенсивности поля дифракции на маске М₁ в оптическую схему (см. рис. 2) устанавливался микроскопный объектив L₃ с десятикратным увеличением так, чтобы он совместно с линзой L₂ строил на матричном приёмнике изображение амплитудной маски М₁, установленной в общей фокальной плоскости линз L₁ и L₂ (см. рис. 3). При помощи матричного приёмника записывались координаты отверстия в маске, измеряемые в элементах матрицы. После этого маска М₁ заменялась на маску М₂ и при помощи трансляторов приводилась в такое положение, чтобы непрозрачный круг имел те же координаты, что и отверстие в маске М₁ при предыдущем измерении. Точность такого метода позиционирования определяется соотношением между диаметром изображения отверстия в маске М₁ на матрице фотоприёмника и размером элемента матрицы. Было экспериментально установлено, что в случае, когда размер отверстия на изображении составляет несколько десятков элементов матрицы, влияние ошибки позиционирования является пренебрежимо малым и не сказывается на точности измерения фазы оптического излучения.

Экспериментальная апробация метода дополнительных экранов заключалась в проведении серии измерений пространственных распределений фазы для световых пучков с волновыми фронтами различной формы. Волновые фронты создавались при помощи точечного источника света, удалённого на некоторое расстояние от входной плоскости измерительной системы, и диафрагмы, ограничивающей размеры пучка. Распределения фазы сформированных таким образом пучков могут быть легко рассчитаны теоретически. Сравнение экспериментально измеренных распределений фазы с рассчитанными позволяет оценить точность дифракционного метода.

На рис. 4 и 5 представлены примеры результатов измерения фазы для светового пучка, сформированного при помощи точечного источника лазерного излучения, удалённого от входной плоскости измерительной системы на расстояние, равное 3,16 м, и диафрагмы с диаметром отверстия 3 мм. На рис. 4 представлены результаты измерений трёх интенсивностей: интенсивности $I(x, y)$ изображения исходного пучка, интенсивности $I_1(x, y)$ поля дифракции на маске М₁ и интенсивности $I_2(x, y)$ поля дифракции на маске М₂. На рис. 5а представлено двумерное восстановленное по

результатам трёх измерений интенсивности, необходимых для восстановления фазы волнового поля при помощи дифракционного метода: интенсивность $I(x, y)$ изображения исходного светового пучка (а), интенсивность $I_1(x, y)$ поля дифракции на маске М₁ (б), интенсивность $I_2(x, y)$ поля дифракции на маске М₂ (в). Светлые оттенки серого цвета соответствуют большим значениям интенсивности

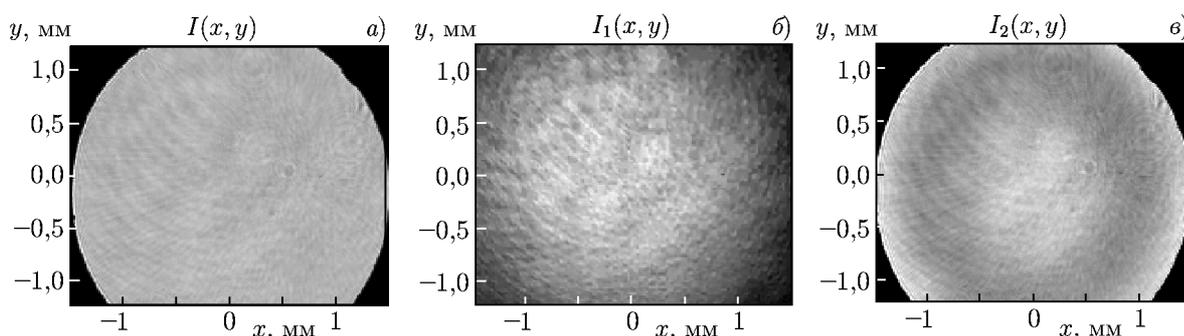


Рис. 4. Результаты трёх измерений интенсивности, необходимых для восстановления фазы волнового поля при помощи дифракционного метода: интенсивность $I(x, y)$ изображения исходного светового пучка (а), интенсивность $I_1(x, y)$ поля дифракции на маске М₁ (б), интенсивность $I_2(x, y)$ поля дифракции на маске М₂ (в). Светлые оттенки серого цвета соответствуют большим значениям интенсивности

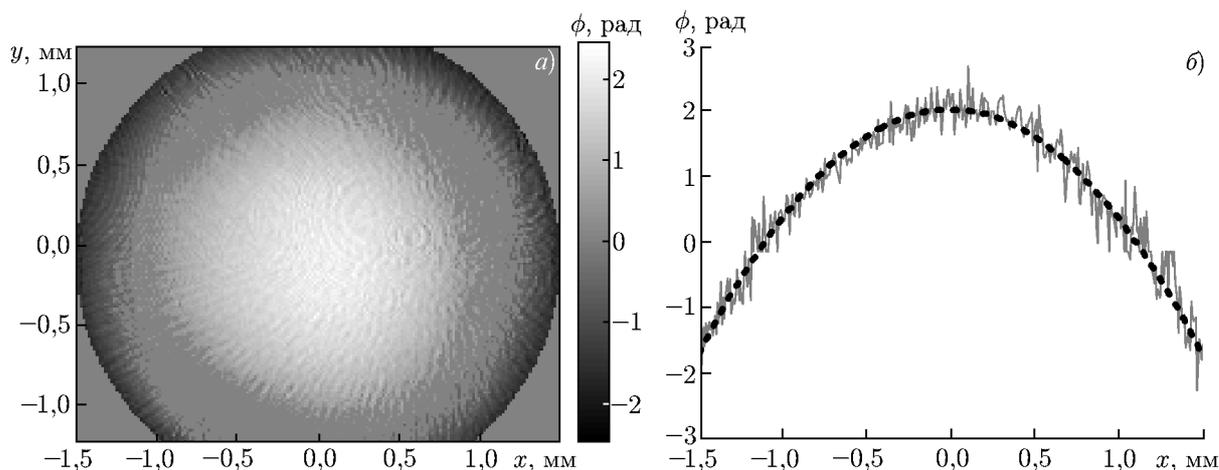


Рис. 5. Результаты эксперимента по измерению фазы волнового поля при помощи дифракционного метода: на панели (а) представлено двумерное распределение, восстановленное по экспериментальным данным распределение фазы $\phi(x, y)$; на панели (б) — соответствующее одномерное распределение при фиксированной координате $y = 0$ мм (серая линия) в сравнении с теоретически рассчитанным распределением фазы $\phi_{\text{theor}}(x, y)$ (штриховая линия)

экспериментальным данным распределение фазы $\phi(x, y)$, на рис. 5б — соответствующее одномерное распределение при фиксированной координате y в сравнении с теоретически рассчитанным распределением фазы $\phi_{\text{theor}}(x, y) = -(\pi/\lambda L)(x^2 + y^2)$.

Для проведённой серии экспериментов разница между измеренными, $\phi(x, y)$, и теоретически рассчитанными, $\phi_{\text{theor}}(x, y)$, распределениями фазы в каждой точке апертуры светового пучка не превышала 0,2 рад. Отсюда можно заключить, что точность измерения положения волнового фронта оптического излучения в проведённых экспериментах составляла порядка $\lambda/30$, где λ — длина волны оптического излучения.

3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО МЕТОДА

Важной характеристикой любого метода регистрации волнового поля является его пространственное разрешение, т. е. наименьший масштаб изменения поля, который возможно зарегистрировать этим методом. Пространственное разрешение метода дополнительных экранов определяется разрешением, с которым линза L_2 может построить изображение пучка, падающего на линзу L_1 [8].

Экспериментальное исследование пространственного разрешения, обеспечиваемого рассматриваемой экспериментальной установкой, заключалось в следующем. В коллимированный световой пучок, падающий на входную плоскость измерительной системы, вставлялась кварцевая пластина, на половину апертуры которой было нанесено кварцевое напыление с оптической толщиной $\lambda/2$ (см. рис. 6). В результате на фазовом фронте измеряемого волнового пучка возникло возмущение, имеющее вид степ-функции. Измерялась фаза полученного волнового пучка, и по уширению указанного возмущения на измеренном распределении фазы оценивалось пространственное разрешение, обеспечиваемое экспериментальной установкой. На рис. 7 представлено измеренное одномерное распределение фазы при фиксированной координате y . Характерное уширение возмущения на измеренном распределении фазы Δx составляет 0,25 мм. Таким образом, созданная экспериментальная установка обеспечивает измерения фазы волнового поля с пространственным разрешением порядка 0,25 мм.

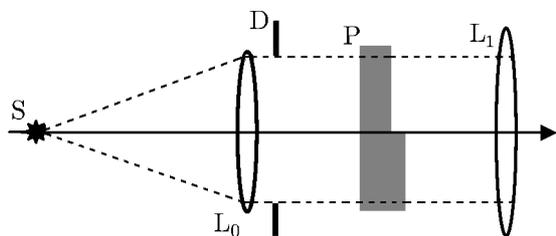


Рис. 6. Оптическая схема, формирующая световой пучок для исследования пространственного разрешения дифракционного метода: S — точечный источник оптического излучения, D — диафрагма, L₀, L₁ — линзы, P — кварцевая пластина с напылением

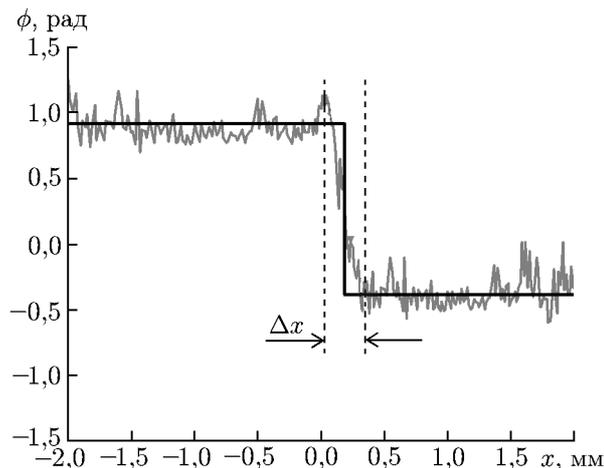


Рис. 7. Результаты исследования пространственного разрешения дифракционного метода, $y = 0$ мм

4. КАЛИБРОВКА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД

Основным источником систематической ошибки при использовании метода дополнительных экранов является неидеальность настройки оптической схемы, а также aberrации входящих в неё оптических элементов, в первую очередь линз. Мы рассматривали вносимую таким образом систематическую ошибку как некую аддитивную добавку $\Delta\phi(x, y)$ к искомому распределению фазы $\phi(x, y)$. Устранить такую ошибку можно калибровкой оптической схемы. Суть калибровки заключается в следующем. Формируется эталонный световой пучок, т. е. пучок с известным распределением фазы. Например, это может быть сферический пучок, созданный при помощи точечного источника излучения, который удалён от входной плоскости измерительной системы на некоторое известное расстояние. Вычитая из измеренного распределения фазы $\phi_{\text{meas}}(x, y)$ известное заранее распределение фазы эталонного светового пучка $\phi_{\text{theor}}(x, y)$, мы можем определить добавку, вносимую элементами оптической схемы экспериментальной установки:

$$\Delta\phi(x, y) = \phi_{\text{meas}}(x, y) - \phi_{\text{theor}}(x, y).$$

Был проведён эксперимент по калибровке оптической схемы. В качестве эталонного рассматривался световой пучок, который формировался при помощи точечного источника, удалённого от входной плоскости измерительной системы на расстояние 3,2 м, и диафрагмы с диаметром отверстия 5 мм. На рис. 8а представлен результат калибровки — фазовая добавка $\Delta\phi(x, y)$, вносимая элементами оптической схемы, при фиксированной координате y . Рисунок 8б соответствует второму измерению, в котором источник был удалён на расстояние 3,195 м, и наглядно иллюстрирует, насколько калибровка оптической схемы позволяет повысить точность измерения фазы. Видно, что в данном случае систематическая ошибка, вносимая элементами оптической схемы, по порядку величины сопоставима с характерным изменением фазы в измеряемом волновом пучке. Тем не менее, измеренное распределение фазы с учётом калибровки с высокой степенью точ-

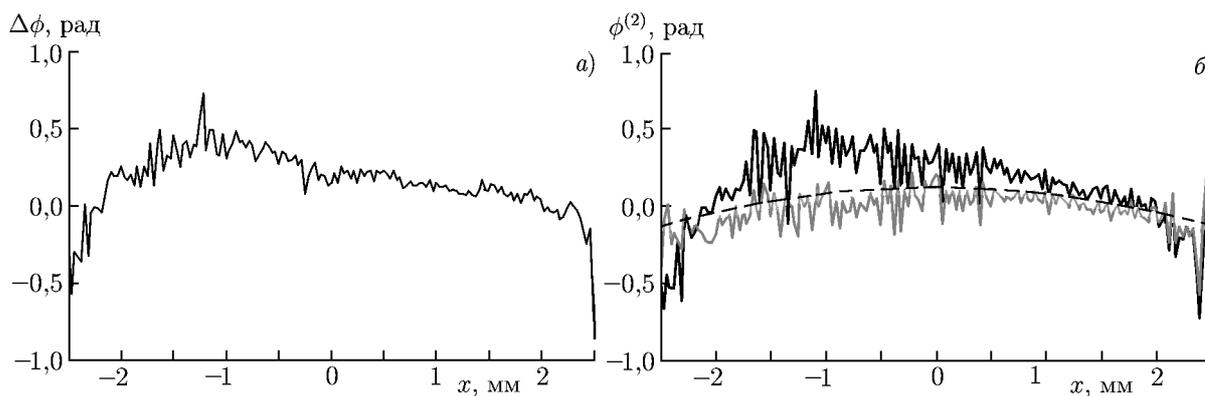


Рис. 8. Результаты калибровки оптической схемы экспериментальной установки, реализующей дифракционный метод. На панели (а) представлена фазовая добавка $\Delta\phi(x, y)$, вносимая элементами оптической схемы, при фиксированной координате $y = 0$ мм (источник удалён на 3,2 м). На панели (б) представлены результаты для источника, удалённого на 3,195 м: измеренное распределение фазы светового пучка $\phi_{\text{meas}}^{(2)}(x, y)$ (сплошная чёрная линия), теоретически рассчитанное распределение фазы светового пучка $\phi_{\text{theor}}^{(2)}(x, y)$ (штриховая линия) и разность $\phi_{\text{meas}}^{(2)}(x, y) - \Delta\phi(x, y)$ (серая линия)

ности соответствует рассчитанному теоретически, что подтверждает необходимость калибровки оптической схемы, реализующей дифракционный метод.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и экспериментально апробирован дифракционный метод регистрации оптических волновых полей. Разработана оптическая схема экспериментальной установки, реализующей данный метод, и установлен порядок эксперимента по измерению фазы оптического волнового поля при помощи метода дополнительных экранов. Проведены измерения фазовых фронтов оптических волновых полей. Экспериментально исследованы такие важнейшие характеристики рассмотренного метода, как точность и пространственное разрешение. В ходе эксперимента удалось достичь точности измерения распределения фазы оптического волнового поля порядка $\lambda/30$ и пространственного разрешения порядка 0,25 мм. Показано, что калибровка оптической схемы, реализующей метод дополнительных экранов, позволяет устранить систематическую ошибку фазовых измерений, вносимую её элементами. Тем самым можно повысить точность измерений фазы, приблизив её к точности, обеспечиваемой интерферометрическими устройствами.

Полученные результаты позволяют надеяться, что дифракционный метод в перспективе может представлять собой хорошую альтернативу традиционным методам измерения оптических волновых полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В. А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
3. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. М. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
4. Shack R. V., Platt B. C. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 656.
5. Zernike F. // Z. Tech. Phys. 1935. V. 16. P. 454.

6. Кузнецова Т. И. // Успехи физич. наук. 1988. Т. 154. С. 677.
7. Merkin A. A., Mironova T. V., Zubov V. A. // J. Russian Laser Res. 2000. V. 21, No. 3. P. 228.
8. Стукачев С. Е., Кожеватов И. Е. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111, № 3. С. 509.
9. Stukachev S. E., Kozhevatorov I. E. // IEEE Conf. Publ. 2014. Int. Conf. "Laser Optics 2014" 2014. R4-20.

Поступила в редакцию 27 октября 2014 г.; принята в печать 24 декабря 2014 г.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DIFFRACTION METHOD OF REGISTRATION OF OPTICAL WAVE FIELDS

S. E. Stukachev and I. E. Kozhevatorov

We have developed and tested experimentally a method for registration of optical wave fields, which is based on diffraction of the optical wave field at two complementary screens. An optical scheme of the experimental setup, which implements this method, has been developed, as well as the experimental procedure used to measure the phase of the optical wave field. The main parameters of the method, such as accuracy and spatial resolution, were studied experimentally. The developed optical scheme was calibrated, which allowed eliminating the consistent error of phase measurements introduced by the scheme elements.