

УДК 738.38

ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА

Ш. М. Исмаилов, Ю. Д. Арапов, В. Г. Каменев*

Всероссийский НИИ автоматики им. Н. Л. Духова, г. Москва, Россия

В работе описываются экспериментальные исследования процесса регистрации рельефа диффузно отражающей поверхности с помощью интерферометра сдвига. В данном интерферометре используется схема Майкельсона, но при этом зеркала служат для совмещения двух идентичных, но смещённых друг относительно друга пучков. Интерференция при этом возникает между смещёнными друг относительно друга точками исходного волнового фронта, имеющими разные фазы. Интерференционная картина в этом случае отражает изменение фазы в каждой точке. В экспериментах применялись два варианта схемы — с использованием увеличивающего объектива вблизи исследуемого образца и с использованием проекционного объектива вблизи интерферометра. В работе также представлены результаты численного моделирования, направленного на исследование предельных возможностей метода. В качестве тестового объекта использовалась модельная деталь, на поверхности которой были сформированы четыре группы геометрических фигур с различными конфигурациями. Это позволило определить предельное пространственное разрешение, предельное смещение вдоль оптической оси, предельную угловую чувствительность и возможность нахождения профиля поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Голографическая диагностика формы микрорельефа поверхности различных материалов представляет собой одну из актуальных задач материаловедения [1, с. 29]. Методы на базе голографической интерферометрии позволяют получить информацию об изменениях формы рельефа при различных воздействиях на материалы — тепловых, ударных и прочих. В большинстве случаев для регистрации используется наложение опорной и сигнальной волн с последующей записью интерференционной картины на цифровую матрицу [2, с. 11–12; 3, с. 28]. Интерференционная картина содержит данные об амплитуде и фазе падающей волны. Численное моделирование интерференции волновых фронтов позволяет получить информацию об изменениях структуры рельефа поверхности. Недостатком методов, основанных на использовании независимой опорной волны, является чувствительность к вибрационным и тепловым воздействиям, влияющим на длину опорного плеча. Альтернативой данному подходу является применение методов осевой голографии, в которых опорный и сигнальный пучки распространяются по одному и тому же пути. Одним из вариантов данного метода является использование дифференциального интерферометра (интерферометра сдвига).

Отличительной чертой методов оптического контроля является, прежде всего, отсутствие материальных контактов с предметом исследования и, как следствие, возможность получения наиболее достоверных экспериментальных результатов [4, 5]. Методы когерентной оптики, а именно голографической интерферометрии, являются универсальными методами исследований. Они позволяют исследовать напряжённо деформированное состояние объектов с диффузной поверхностью. Голографическая интерферометрия является высокоинформативным и высокоточным инструментом получения данных [6].

* ismailov@vniia.net

Интерферометры сдвига активно применяются для контроля качества оптических поверхностей [7], регистрации структуры газовых потоков [8], а также в голографической интерферометрии [9, 10].

В интерферометре сдвига используется схема Майкельсона, но при этом зеркала служат для совмещения двух идентичных, но смещённых друг относительно друга пучков. Интерференция при этом возникает между соседними точками, имеющими разные фазы. Интерференционная картина в этом случае отражает изменение фазы в каждой точке. У такой схемы есть два значительных преимущества: во-первых, не требуется отдельный опорный пучок; во-вторых, волновой фронт может быть любой формы, а исходный образец может иметь любую протяжённость вдоль оптической оси. Последнее очень важно при использовании импульсной лазерной подсветки.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

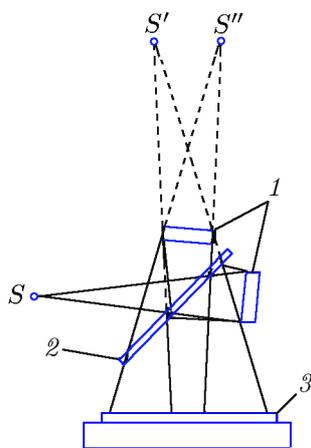


Рис. 1. Принцип работы интерферометра сдвига: 1 — зеркала, 2 — светоделитель, 3 — матричный фотодетектор

Анализ интерференции двух получаемых в интерферометре идентичных пучков позволяет восстановить структуру волнового фронта исходного пучка. На рис. 1 схематично показан принцип работы интерферометра сдвига. Свет от точечного источника S с помощью светоделителя и зеркал делится на два потока, образующих интерференционную картину на матричном фотодетекторе. Данная интерференционная картина эквивалентна той, которая будет образована интерференцией двух когерентных источников S' и S'' в схеме опыта Юнга.

Если исследуемый объект представляет собой не точечный источник, а плоскую отражающую поверхность, то в каждой точке интерференционной картины будет сохраняться постоянная разность фаз. Сама интерферограмма будет представлять собой систему параллельных полос. При наличии локальной неоднородности в какой-либо точке поверхности, например углубления или выступа, лучи, исходящие из этой точки, будут иметь постоянную разность хода относительно соседних точек. На интерферограмме это отобразится как смещение полос, пропорциональное разности хода, а значит, и величине неоднородности. Таким образом, исследуя интерферограмму сдвига, полученную от неоднородной поверхности, можно установить для каждой её точки величину изменения рельефа в направлении смещения волнового фронта.

В ряде случаев исследуемый объект не может быть расположен на лабораторном столе и необходимо осуществлять его дистанционное зондирование. Такое зондирование может выполняться с помощью длиннофокусных оптических систем, направляющих излучение на объект и собирающих рассеянное назад излучение. Для обеспечения разрешения, достаточного для регистрации микроскопических неоднородностей с размерами порядка десятков микрон на расстоянии нескольких метров, может применяться дополнительное оптическое увеличение. Его можно реализовать с помощью короткофокусных оптических приборов, располагаемых либо в непосредственной близости от исследуемого объекта, либо после длиннофокусной системы при трансляции на матричный регистратор.

В экспериментах обрабатывались оба варианта переноса волнового фронта от удалённого объекта. В обоих случаях для формирования подсвеченной области на объекте и переноса рас-

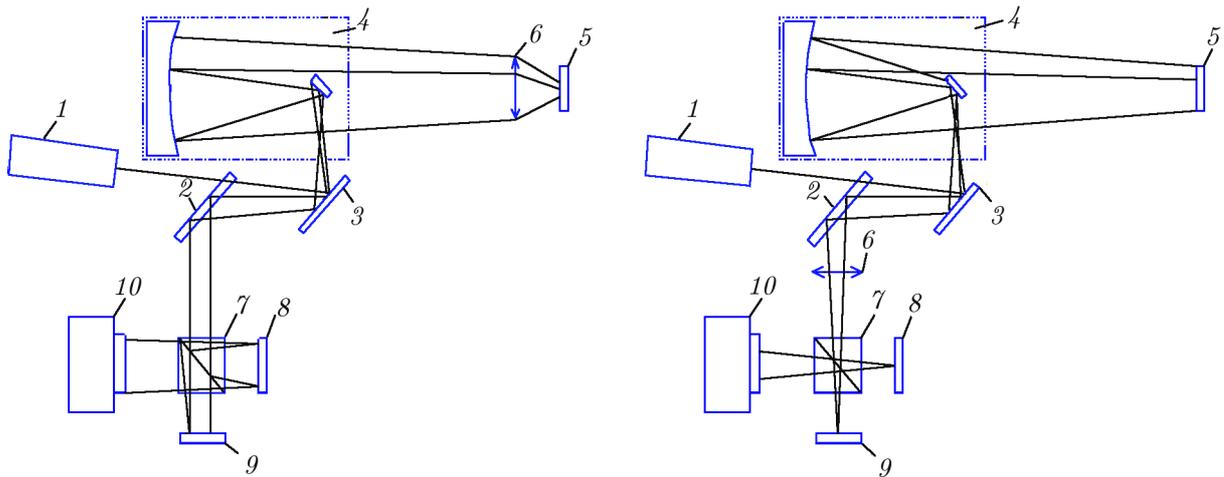


Рис. 2. Варианты макета экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — полупрозрачное зеркало, 3 — поворотное зеркало, 4 — телескоп, 5 — образец, 6 — объектив, 7 — делительный кубик, 8, 9 — зеркала, 10 — цифровая камера

сеянного от него излучения применялось вогнутое сферическое зеркало телескопа-рефлектора. В приёмной части в обоих случаях располагался интерферометр сдвига, формирующий на матричном регистраторе интерференционную картину. В интерферометре сдвига применялась схема Майкельсона на базе двух зеркал и делительного кубика.

В первом варианте (см. рис. 2а) вблизи исследуемого образца располагался объектив, сквозь который на зондируемую поверхность поступало излучение подсветки, а рассеянный свет направлялся в приёмную апертуру телескопа. Во втором варианте (рис. 2б) вблизи узла объекта дополнительные оптические приборы не использовались, но промежуточное изображение, формируемое зеркалом телескопа, ретранслировалось и увеличивалось с помощью проекционного объектива.

В работе использовался непрерывный неодимовый лазер LCS-DTL-317, работающий в режиме генерации второй гармоники (длина волны 532 нм) с мощностью до 50 мВт и обеспечивающий формирование пучка с одной продольной модой ($TEM_{0,0}$). В качестве светоделиителя использовалось диэлектрическое зеркало, обеспечивающее разделение падающего под углом 45° пучка на отражённый и прошедший в соотношении 50:50. Поворотное и вогнутое зеркала были взяты из конструкции телескопа Sky-Watcher Dob 10 250/1200. Для дополнительного увеличения изображения в обоих вариантах схемы применялся объектив «Юпитер-3». Интерферограмма регистрировалась камерой CSDU-285 с матрицей Sony CCD ICX285AL с размерами $8,77 \times 6,60$ мм, размером пикселя $6,45 \times 6,45$ мкм и разрешением 1392×1032 пикселя.

Характерный размер исследуемых неоднородностей составлял величину порядка десятков микрон. При регистрации более крупномасштабных элементов рельефа (более 100 мкм) исследовались краевые области рельефа, в которых происходило плавное изменение высоты неоднородности. Угол схождения пучков менялся в интервале от 3 до 6 мрад для первого варианта установки и в интервале от 1 до 2 мрад для второго варианта. При этом на матричном фотодетекторе линейный сдвиг волновых фронтов друг относительно друга составлял величину около 30 мкм для первого варианта и 10 мкм для второго варианта схемы.

На рис. 3 показана сдвиговая интерферограмма участка тест-объекта (монеты), полученная с использованием первого варианта установки. Данное изображение наглядно демонстрирует сдвиг полос на интерферограмме в областях с изменением рельефа (граница цифры 1 на монете).

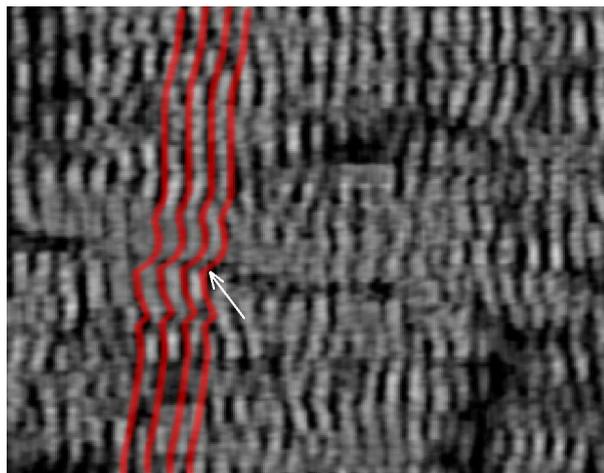


Рис. 3. Сдвиговая интерферограмма участка тест-объекта (монеты). Стрелкой показана граница рельефа

преобразованию для опорной плоской наклонной волны с последующей свёрткой с сигнальной волной [12].

Следует отметить, что волны, образуемые интерферометром сдвига, являются одновременно и опорными, и сигнальными. Смещённая в центр спектра область подвергалась фильтрации с удалением остальных компонент спектра. При обратном фурье-преобразовании восстанавливались комплексный двумерный массив, из которого можно получить информацию об амплитудном (корень из суммы квадратов действительной и мнимой частей) и фазовом (арктангенс отношения мнимой и действительной частей) распределении.

На рис. 5 приведены результаты обработки одной из полученных интерферограмм. Из исход-

Таким образом, схема с расположением объектива на узле объекта продемонстрировала возможность регистрации интерферограмм сдвига. Однако качество данных интерферограмм позволяет скорее качественно, чем количественно оценить наличие изменений фазы.

Данные интерферограммы обрабатывались с помощью стандартного алгоритма восстановления [11], применяемого в цифровой голографии (для голограмм сфокусированного изображения). Его схема показана на рис.4. Исходная интерферограмма подвергалась двумерному фурье-преобразованию, в результате находился комплексный фурье-спектр. Далее выделялся боковой максимум спектра и проводилось смещение на величину несущей частоты интерферограммы, соответствующее фурье-

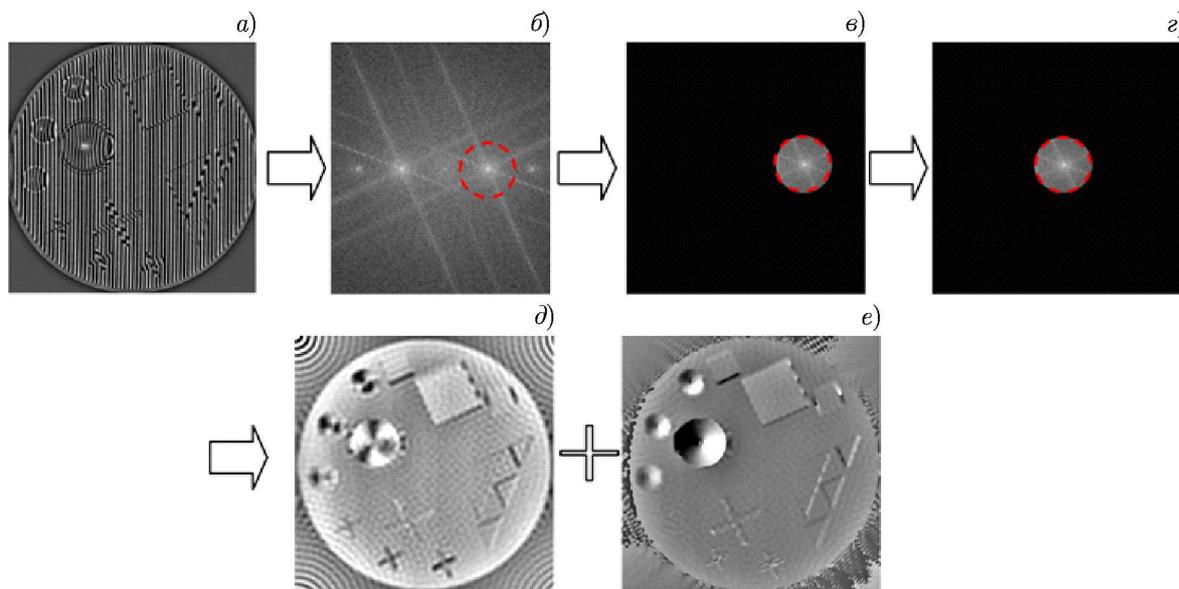


Рис. 4. Алгоритм восстановления амплитуды и фазы из интерферограмм: *a* — исходная интерферограмма, *б* — фурье-спектр, *в* — фильтрация боковой компоненты, *г* — перенос боковой компоненты в центр, *д* — амплитудное распределение, *е* — фазовое распределение

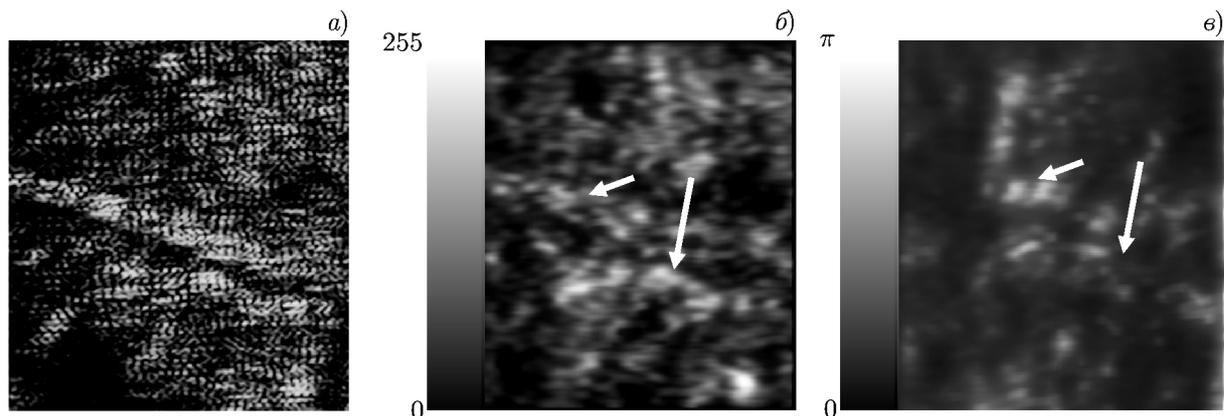


Рис. 5. Пример обработки полученной интерферограммы: *a* — исходная интерферограмма, *б* — восстановленное амплитудное распределение, *в* — восстановленное фазовое распределение; стрелками показана граница рельефа

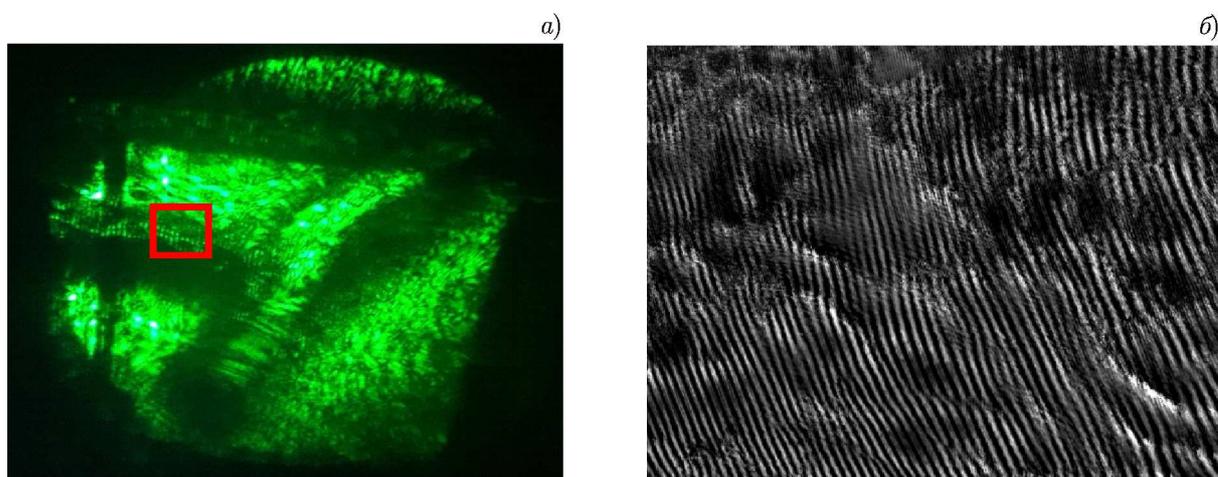


Рис. 6. Общий вид регистрируемой интерферограммы (*a*) и её увеличенный фрагмент (*б*)

ной интерферограммы (рис. 5*a*) восстановлены амплитудное (рис. 5*б*) и фазовое (рис. 5*в*) распределения. Фазовое распределение получено со значительным уровнем шума. Наиболее вероятным объяснением этого является наличие многочисленных локальных неоднородностей на поверхности образца. Однако в центральной части фазового распределения можно идентифицировать две параллельные светлые линии, соответствующие границе рельефа цифры 1 на монете. Данная граница рельефа видна также и на амплитудном распределении.

При реализации второй схемы макета системы регистрации было обеспечено более высокое увеличение и, как следствие, более высокое качество интерференционных полос. На рис. 6*a* приведён общий вид регистрируемой интерферограммы, а на рис. 6*б* показан увеличенный фрагмент, на котором видны интерференционные полосы. Увеличенная область на рис. 6*a* обозначена красной рамкой.

Качество интерферограммы в данном случае существенно выше. На рис. 7 показаны результаты её обработки. Из исходной интерферограммы (рис. 7*a*) восстановлены амплитудное (рис. 7*б*) и фазовое (рис. 7*в*) распределения. Фазовое распределение отображает сдвиг полос зарегистрированного участка интерферограммы и может быть интерпретировано как отображение изменений рельефа по направлению сдвига. Сравнение неоднородностей освещения на рис. 7*a* и фазовых

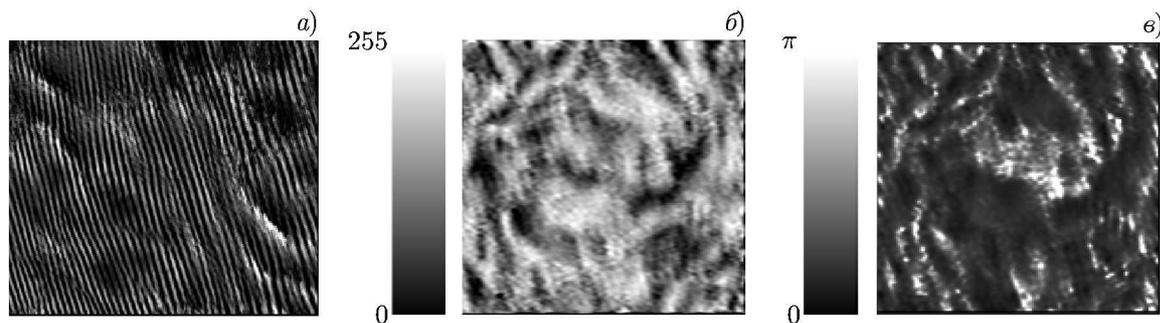


Рис. 7. Пример обработки полученной интерферограммы: *a* — исходная интерферограмма, *б* — восстановленное амплитудное распределение, *в* — восстановленное фазовое распределение

изменений на рис. 7в показывает сходную, но не вполне совпадающую картину. Это может быть связано как с различием оптических свойств для ровной поверхности (например, с наличием коррозионных пятен), так и с особенностями отображения на сдвиговой интерферограмме различных видов неоднородности рельефа. Для уточнения интерпретации результатов в дальнейших экспериментах должны использоваться независимые методы контроля, а также калибрована на образцах с известной величиной неоднородности рельефа.

2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА

Оценка предельных возможностей метода восстановления изменений формы поверхности с помощью интерферометра сдвига выполнялась на основе известного метода оценки качества поверхности, который применяют в астрономии и лазерной технике и который заключается в восстановлении профиля поверхности по данным интерферометрических измерений с помощью его аппроксимации полиномами Цернике [13]. Аналогичный метод используется при исследовании и корректировке искажений волнового фронта в твердотельных лазерах [14], что эквивалентно исследованию искажения волнового фронта при отражении от неровной поверхности, выполненному в данной работе. Тем самым проведена верификация голографического восстановления профиля поверхности с помощью известного способа, который используется в астрономической и лазерной технике.

В программном комплексе Zemax была создана модель интерферометра, соответствующая постановке эксперимента. В качестве тестового объекта использовалась сформированная в системе автоматизированного проектирования деталь, изображение которой представлено на рис. 8. На поверхности тестового объекта были сформированы четыре группы геометрических фигур с различными конфигурациями для определения предельных возможностей метода. В табл. 1 представлены характеристики тестового объекта. Первая группа предназначена для определения возможности регистрации наклонов на поверхности, вторая — для определения возможности регистрации объектов различной высоты, третья — для определения предельных возможностей регистрации объектов разных поперечных размеров, четвертая — для определения предельных возможностей регистрации объектов с неплоскими поверхностями. Тестовый объект устанавливался в модели интерферометра на место отражающей поверхности геометрическими фигурами навстречу зондирующему лазерному пучку с длиной волны 532 нм. После прохождения интерферометра на детекторе формировалось изображение, пример которого представлен на рис. 9.

Восстановление изображений осуществлялось двумя методами: с помощью стандартного метода обработки, описанного в предыдущем разделе, и с помощью метода на основе полиномов Цернике. Полученные интерферограммы позволяют определить профиль волнового фронта от-

Таблица 1. Характеристики геометрических групп тестового объекта (см. рис. 8)

Группа.объект	Конфигурация	Описание
1.1	Усечённая призма с квадратным основанием	Размер основания 10×10 мм, высота призмы 500 мкм, угол между верхним основанием и плоскостью сечения $0,05^\circ$
1.2		Размер основания 5×5 мм, высота призмы 500 мкм, угол между верхним основанием и плоскостью сечения $0,0025^\circ$
1.3		Размер основания 10×10 мм, высота призмы 500 мкм, угол между верхним основанием и плоскостью сечения $0,01^\circ$
2.1	Призма с основанием в виде равнобедренного треугольника	Равные стороны с длиной 10 мм, высота призмы 200 мкм
2.2		Равные стороны с длиной 5 мм, высота призмы 150 мкм
2.3		Равные стороны с длиной 5 мм, высота призмы 100 мкм
2.4		Равные стороны с длиной 5 мм, высота призмы 50 мкм
3.1	Призма с основанием в виде креста	Длина крестовин 10 мм, ширина крестовин 2 мм, высота призмы 200 мкм
3.2		Длина крестовин 5 мм, ширина крестовин 1 мм, высота призмы 100 мкм
3.3		Длина крестовин 5 мм, ширина крестовин 0,5 мм, высота призмы 200 мкм
3.4		Длина крестовин 5 мм, ширина крестовин 0,1 мм, высота призмы 200 мкм
4.1	Конус	Диаметр основания 10 мм, высота конуса 25 мкм
4.2		Диаметр основания 5 мм, высота конуса 5 мкм
4.3		Диаметр основания 5 мм, высота конуса 4 мкм
4.4		Диаметр основания 5 мм, высота конуса 3 мкм

ражённого от поверхности излучения [11] и вычислить дифференциал фазы, отображающий изменения формы профиля отражающей поверхности [12]. Вычисления фазовой составляющей интерферограммы первым методом выполнено в программе ImageJ, для второго метода использо-

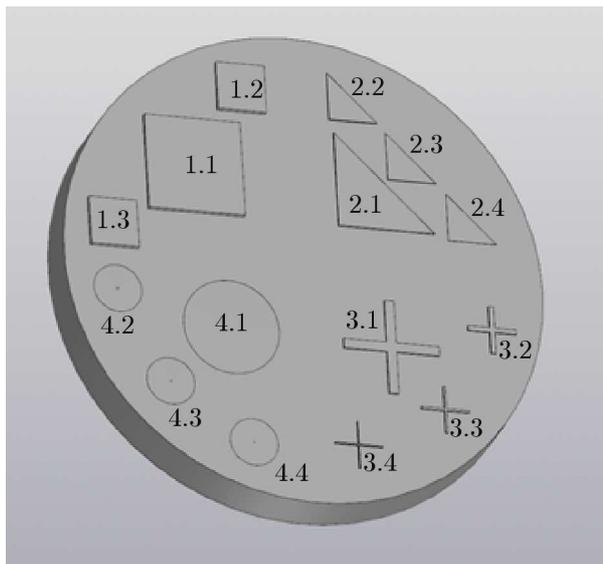


Рис. 8. Тестовый объект для определения предельных возможностей метода

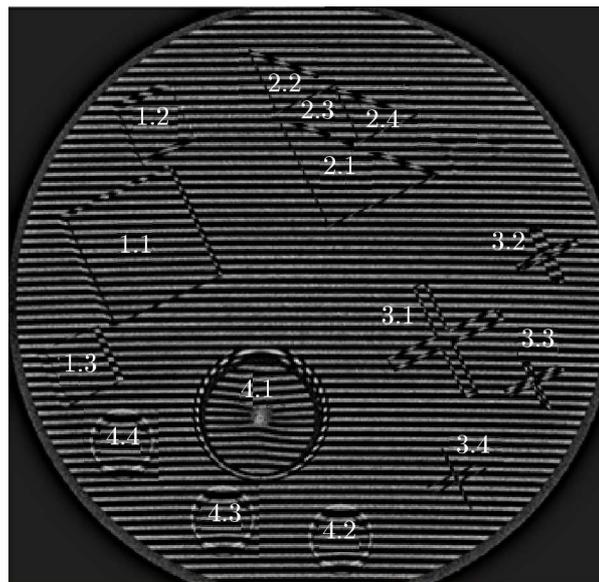


Рис. 9. Интерференционное изображение тестового объекта в интерферометре сдвига (отметки соответствуют рис. 8)

вана программа DFTFringe [15], которая предназначена для анализа качества поверхности зеркал и применяется при проектировании астрономических телескопов. Она позволяет оценить качество поверхности по методу Фуко и с использованием полиномов Цернике на основе интерферограмм. В нашем случае поверхность тестового объекта плоская, с группами объектов различной геометрии и высоты, которые формируют картину полос в модели интерферометра сдвига. Проводился анализ полученной интерферограммы с целью получения информации о геометрических размерах объектов. Результат обработки интерферограммы тестового объекта, сгенерированной в интерферометре сдвига в программе Zemax, представлен на рис. 10–14. Цветовая палитра этих рисунков определяется возможностями программы DFTFringe.

На рис. 10 представлены результаты восстановления распределения фазы в программе ImageJ, карта поверхности и теневая картина, полученная по методу Фуко в программе DFTFringe. При формировании карт поверхности выполнялась аппроксимация с использованием набора из первых 47 полиномов Цернике. Трёхмерная картина распределения фазы на рис. 10а, полученная в программе ImageJ, отображает изменения рельефа поверхности. Данный метод в этом случае даёт более резкие границы объектов, чем метод полиномов Цернике. Данные о характере изменений исследуемой поверхности, полученные с использованием теневого метода Фуко (см. рис. 10б), имеют качественный характер и не позволяют определить высоту объектов в их группах на тестовой поверхности. Восстановленная картина изменений формы поверхности по данным, полученным с помощью метода на основе полиномов Цернике (см. рис. 10б), не позволяет определить параметры отдельных групп, т. к. применяемые для расчётов полиномы не обеспечивают возможность локального анализа отражающей поверхности и группы объектов имеют разную высоту. Поэтому был выполнен локальный анализ интерферограммы по геометрическим группам. Результаты представлены на рис. 11–14.

Из рис. 11 можно видеть, что объекты представляют собой конусы с различными высотами. Высоты объектов составляют около 20, 5, 4 и 3 мкм для объектов 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 соответственно. Из рис. 12 можно видеть, что объекты группы 3 представляет собой кресты различной

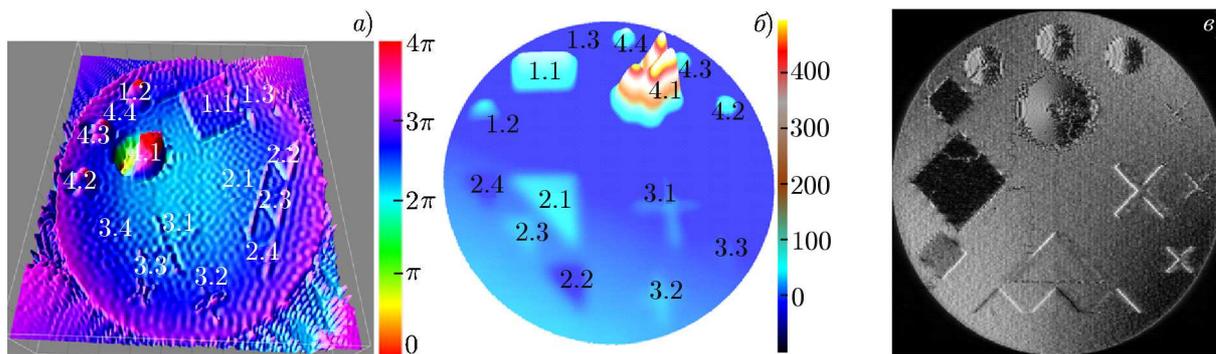


Рис. 10. Обработка интерферограммы тестового объекта: *a* — трёхмерная картина распределения фазы, полученная в программе ImageJ; *b* — восстановление с помощью полиномов Цернике (профиль поверхности, шкала в микрометрах); *c* — восстановление с использованием теневого метода Фуко в программе DFTFringe

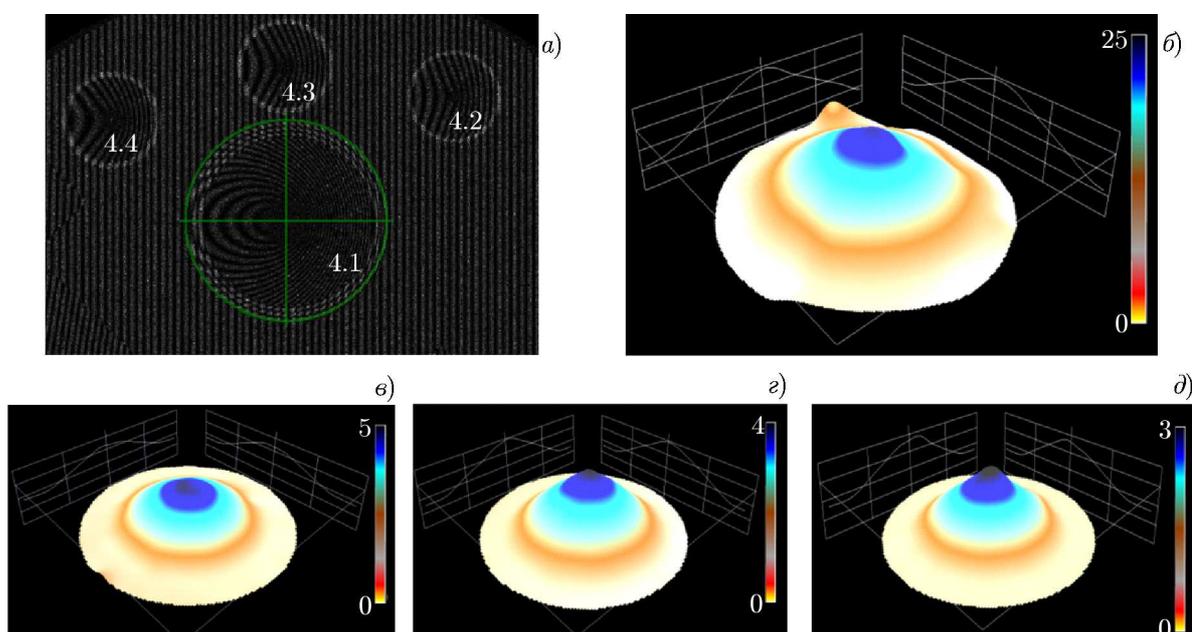


Рис. 11. Обработка интерферограммы четвёртой группы тестового объекта: *a* — локальная часть интерферограммы, *b* — карта поверхности объекта 4.1, *c* — карта поверхности объекта 4.2, *d* — карта поверхности объекта 4.3, *e* — карта поверхности объекта 4.4; шкалы в микрометрах

ширины. Уменьшение ширины крестовин привело к тому, что качество восстановления снижается таким образом, что для объектов с шириной крестовин 1 мм наблюдаются локальные дефекты (рис. 12*в*). Дальнейшее уменьшение ширины крестовин приводит к росту ошибок восстановления. При ширине крестовин 0,5 мм возможно частичное восстановление формы и оценка высоты поверхности (рис. 12*г*). При ширине крестовин 0,1 мм восстановление формы и оценка высоты объекта не представляются возможными (рис. 12*д*). Из рис. 13 можно видеть, что объекты представляют собой треугольники с различными высотами. Высоты объектов составляют около 200, 150, 100 и 50 мкм для объектов 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 соответственно.

Как показал анализ полученной интерферограммы и восстановленных объектов, локальное рассмотрение позволяет значительно улучшить разрешающую способность используемого метода регистрации изменений формы рельефа поверхности. При уменьшении рассматриваемой площа-

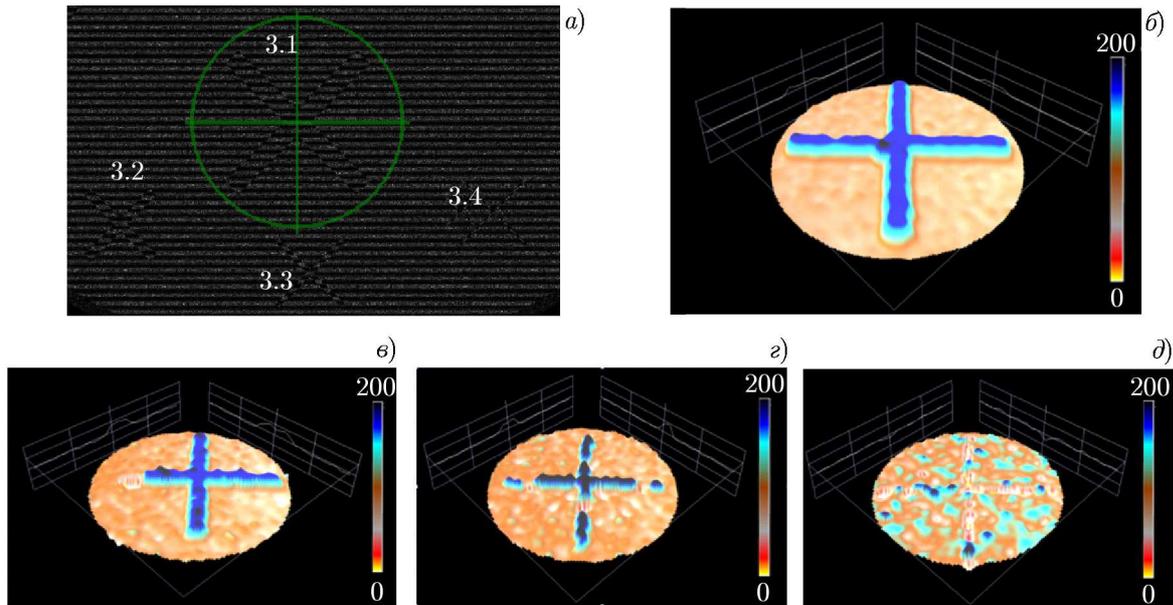


Рис. 12. Обработка интерферограммы третьей группы тестового объекта: *a* — локальная часть интерферограммы, *b* — карта поверхности объекта 3.1, *c* — карта поверхности объекта 3.2, *z* — карта поверхности объекта 3.3, *d* — карта поверхности объекта 3.4; шкалы в микрометрах

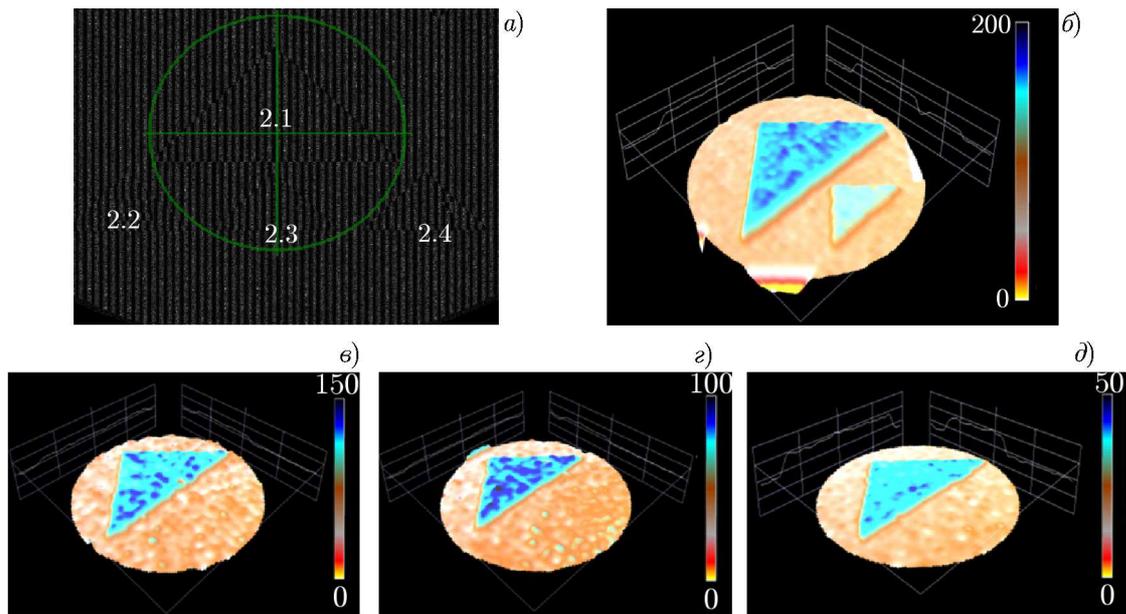


Рис. 13. Обработка интерферограммы второй группы тестового объекта: *a* — локальная часть интерферограммы, *b* — карта поверхности объекта 2.1, *c* — карта поверхности объекта 2.2, *z* — карта поверхности объекта 2.3, *d* — карта поверхности объекта 2.4; шкалы в микрометрах

ди поверхности до размеров группы полинома Цернике точнее описывают отражённый волновой фронт и качество восстановления сигнала увеличивается (см. рис. 11–14). Тестовые объекты, кроме первой и третьей групп, наблюдались достаточно чётко; амплитуда профиля поверхности, определённая с помощью полиномов Цернике, совпадает с амплитудой тестового объекта с точностью в среднем не хуже 5÷10%. При этом локальные неравномерности профиля восста-

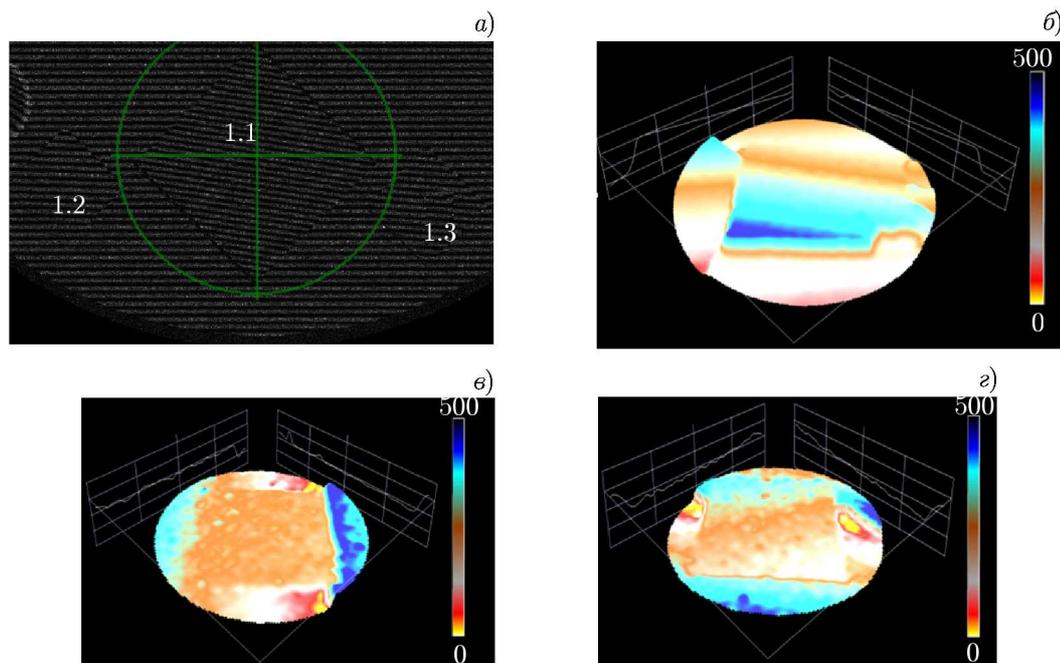


Рис. 14. Обработка интерферограммы первой группы тестового объекта: *a* — локальная часть интерферограммы, *б* — карта поверхности объекта 1.1, *в* — карта поверхности объекта 1.2, *г* — карта поверхности объекта 1.3; шкалы в микрометрах

навливаемой поверхности объектов достигали 100%. Также необходимо отметить, что для объектов крестовидной формы при уменьшении ширины крестовин наблюдалось снижение качества восстановления, выраженное в возникновении провалов и уменьшении контраста высот вплоть до уровня окружающей поверхности, что, по-видимому, связано с ограничением диапазона аппроксимации профиля поверхности выбранным набором полиномов Цернике. В результате для объекта 3.4 видно, что возможно определение только его формы, а анализ и измерение его геометрических параметров затруднён. Это свидетельствует о том, что в данной постановке моделирования наблюдается ограничение разрешающей способности при ширине объекта около 0,5 мм. В результате восстановления по группам высоты объектов групп 2, 3 и 4 близки к начальным.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что схема с расположением объектива на узле объекта продемонстрировала возможность регистрации интерферограмм сдвига, однако они позволяют лишь качественно оценить наличие изменений фазы. При реализации второй схемы макета системы регистрации было обеспечено более высокое увеличение и, как следствие, более высокое качество интерференционных полос.

Анализируя полученные результаты расчётных оценок возможностей метода восстановления поверхности с помощью интерферометра сдвига и метода восстановления профиля поверхности на основе полиномов Цернике в использованной постановке эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1) возможны восстановление и оценка высоты объектов на плоской поверхности с высотой от десятков до сотен микрометров;

2) в эксперименте максимальная высота восстанавливаемых объектов достигала 500 мкм, минимальная 3 мкм;

3) достигнутое разрешение позволяет осуществлять восстановление формы объектов с размерами от 0,5 мм;

4) возможно восстановление объектов с неровной поверхностью с перепадами до $0,01^\circ$.

В дальнейшем необходимо развить данный метод в части учёта шумов при регистрации реальных объектов и разработать алгоритм определения ошибки восстановления их формы и измерения геометрических размеров, что позволит уточнить предельные возможности метода. Также необходимо изучить возможность регистрации сильно рассеивающих объектов.

В целом, возможности метода позволяют успешно использовать его в сочетании с импульсными лазерными излучателями для регистрации быстропротекающих процессов при ударно-волновом нагружении объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Р. А. Разработка системы неразрушающего контроля на основе методов цифровой голографической интерферометрии : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 117 с.
2. Гинзбург В. М., Степанов Б. М. Голографические измерения. М. : Радио и связь, 1981. 296 с.
3. Гужов В. И. Математические методы цифровой голографии. Новосибирск : Новосибирский гос. техн. ун-т, 2017. 81 с.
4. Powell R. L., Stetson K. A. // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55, No. 12. P. 1593–1599. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001593>
5. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. // Журн. техн. физ. 1967. Т. 37, № 2. С. 360–365.
6. Пат. 2289098 РФ, МПК G01B 15/06 (2006.01), G03H 1/22 (2006.01). Способ определения деформаций диффузно отражающих объектов : № 2005122091/28 : заявл. 12.07.2005 : опубл. 10.12.2006 / Большаков О. П., Котов И. Р., Майоров Е. Е. и др. 10 с.
7. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб. : Ун-т ИТМО, 2019. 94 с.
8. Иншаков С. И. // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та. 2007. № 2. С. 108–113.
9. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Прокопенко В. Т., Хайдаров Г. Г. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. 2012. № 4. С. 31–35.
10. Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Пономарев С. Е., Черняк Т. А. // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 32–40. <https://doi.org/10.18358/np-27-2-i3240>
11. Чемякин Э. В., Алехнович В. И. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2004. № 3. С. 72–78.
12. Рябухо В. П., Перепелицына О. А., Максимова Л. А. Цифровая фурье-голография. Учебно-методическое пособие. Саратов : Саратовский гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского, 2014. 34 с.
13. Бабкина Л. А., Гармай Ю. П., Лебедев Д. В. и др. // Сиб. журн. вычисл. математики. 2013. Т. 16, № 2. С. 147–163.
14. Корольков В. П., Насыров Р. К., Полещук А. Г. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 2. С. 117–121.
15. <https://github.com/githubdoe/DFTFringe/releases>

Поступила в редакцию 16 апреля 2020 г.; принята в печать 31 августа 2020 г.

HOLOGRAPHIC STUDY OF SURFACE RELIEF USING A SHEAR INTERFEROMETER

Sh. M. Ismailov, Yu. D. Arapov, and V. G. Kamenev

We describe experimental studies of the recording of the relief of a diffusely reflecting surface using a shear interferometer. The interferometer uses the Michelson scheme, but the mirrors serve to combine two identical beams displaced with respect to each other. In this case, interference arises between the neighboring points having different phases. The interference pattern reflects the change in phase at each point. Two variants of the scheme were employed in the experiments: one scheme uses a magnifying lens near the sample and the other, a projection lens near the interferometer. The paper also presents the results of numerical simulation aimed at studying the ultimate capabilities of the method. A model part, on the surface of which four groups of geometric figures with different configurations were formed, was used as the test object. This allowed one to determine the limiting spatial resolution, the limiting displacement along the optical axis, the limiting angular sensitivity, and the possibility of finding the surface profile.