

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ПРОЕКЦИИ ПОЛОС

© 2011 г. Г. Н. Вишняков, доктор техн. наук; К. Е. Лоцилов

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

E-mail: vish@vniiofi.ru loshchilov@vniiofi.ru

В рамках геометрической оптики проведен анализ четырех основных вариантов оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации его изображения для измерения формы трехмерных объектов. Показано, что только два варианта оптической схемы позволяют использовать алгоритмы расшифровки интерферограмм для реконструкции топограмм поверхности объекта.

Ключевые слова: проекция полос, оптическая триангуляция, профилометрия, топограмма.

Коды OCIS: 120.6650

Поступила в редакцию 15.06.2010

При решении различных задач проектирования, дизайна, безопасности, промышленного контроля, метрологии требуются данные о геометрической форме и размерах объектов в трехмерном пространстве. Одними из самых распространенных бесконтактных методов получения данных о форме трехмерных объектов являются методы, основанные на оптической триангуляции [1, 2].

Принцип действия любого бесконтактного профилометра, в основе которого лежит метод оптической триангуляции, заключается в проецировании на объект точки, линии или системы полос и регистрации полученного изображения объекта. Причем направления проецирования и регистрации изображения составляют некоторый угол, за счет чего возможно получить данные о высоте объекта.

Простейшими устройствами такого типа являются профилометры, которые проецируют на объект точку или линию. При этом данные о высоте объекта получаются, соответственно, только в этой точке или вдоль линии. Для получения всей топограммы поверхности необходимо сканирование объекта. Это является основным недостатком сканирующих профилометров, так как для измерения всей поверхности объекта требуется значительное время. Другим недостатком является сложность конструкции сканирующего узла.

При измерении динамических объектов, как правило, применяют профилометры, в которых для освещения используется структурированный свет в виде системы параллельных черно-белых, полутоновых или цветных полос. Информация о высоте (глубине) объекта в этом случае заключена в деформации системы полос. Для извлечения этой информации требуются математические выражения, связывающие поперечные отклонения полос с высотой объекта, которые зависят от геометрии оптической схемы.

В настоящей работе в рамках геометрической оптики рассмотрены четыре варианта оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации его изображения. Их объединяет то, что источник освещения и регистратор изображения находятся на одном расстоянии от некоторой базовой плоскости, на которой находится объект. Различие заключается в оптических схемах проецирующего и регистрирующего каналов. Показано, что только два варианта оптической схемы позволяют использовать алгоритмы расшифровки интерферограмм для реконструкции топограмм поверхности объекта.

Возможны следующие варианты:

1. Освещение и регистрация изображения объекта в параллельных пучках.
2. Освещение и регистрация изображения объекта в конусных пучках.

3. Освещение объекта в конусных пучках, а регистрация изображения объекта в параллельных пучках.

4. Освещение объекта в параллельных пучках, а регистрация изображения объекта в конусных пучках.

Здесь предполагается, что в схемах с конусными пучками используются обычные объективы, а в схемах с параллельными пучками – афокальные или телескопические оптические системы, состоящие из двух объективов с общей фокальной плоскостью.

Далее приведены варианты оптических схем освещения объекта и регистрации его изображения. Для каждого варианта оптической схемы выведены формулы, связывающие отклонение полос с высотой объекта.

СХЕМА 1

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации его изображения в конусных пучках показана на рис. 1.

Здесь и далее предполагаем, что центры входных зрачков объективов источника освещения O'' и регистратора O' расположены на одном расстоянии l от плоскости XU (ось Y перпендикулярна плоскости рисунка) и на расстоянии d друг от друга. Оптические оси освещающего и регистрирующего каналов расположены под углом θ относительно друг друга.

Выберем из конуса лучей, исходящих из точки O'' , произвольный луч $O''B$. Первые измерения проводят без объекта, показанного на рис. 1 в виде дуги. Считаем, что объект на-

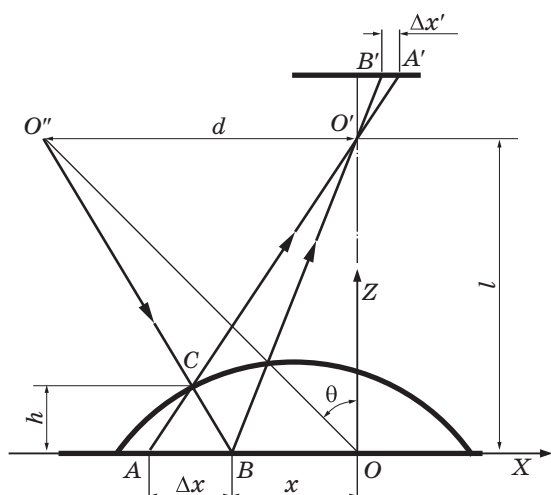


Рис. 1. Схема освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта в конусных пучках.

ходится на некоторой плоскости XU , которая называется базовой. Предполагаем, что объект и базовая плоскость являются диффузно-отражающими поверхностями, поэтому луч $O''B$, попадая на базовую плоскость XU , создает светящуюся точку B . Объектив O' формирует изображение данной точки на светочувствительной площадке регистратора в точке B' . При наличии объекта луч $O''B$ создает на его поверхности другую светящуюся точку C . Изображение данной точки на чувствительной площадке регистратора сместится на $\Delta x'$ в точку A' . Отсюда видно, что информация о высоте h точки C относительно базовой плоскости содержится в поперечном смещении ее изображения. В этом заключается суть метода триангуляции.

Выведем выражение, связывающее высоту объекта h в точке C с размером отрезка $\Delta x' = B'A'$.

Из подобия треугольников $O''O'C$ и ABC следует

$$\frac{\Delta x}{h} = \frac{d}{l-h}. \quad (1)$$

Тогда высота объекта h будет

$$h = \frac{\Delta x}{d/l + \Delta x/l}. \quad (2)$$

Из треугольника $OO'O''$ следует

$$\operatorname{tg}\theta = d/l. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в выражение (2), получим

$$h = \frac{\Delta x}{\operatorname{tg}\theta + \Delta x/l}. \quad (4)$$

Из подобия треугольников ABO' и $A'B'O'$ следует

$$\Delta x = \beta \Delta x', \quad (5)$$

где β является фактически коэффициентом увеличения оптической системы.

Таким образом, окончательная формула для высоты объекта при схеме освещения объекта и регистрации его изображения в конусных пучках будет представлена в следующем виде:

$$h = \frac{\beta \Delta x'}{\operatorname{tg}\theta + \beta \Delta x'/l}. \quad (6)$$

СХЕМА 2

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистра-

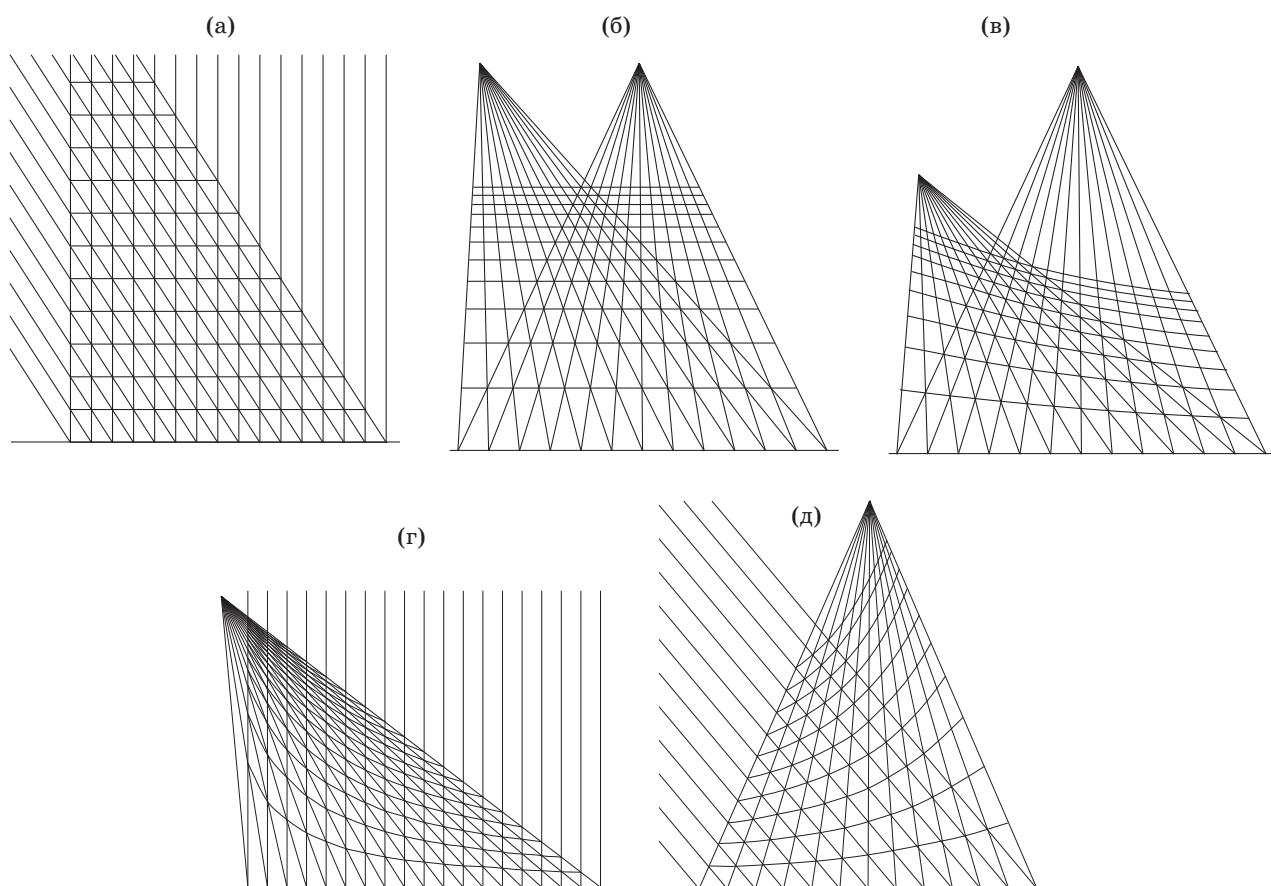


Рис. 5. Поверхности постоянной фазы в схеме освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта в параллельных пучках (а), в конусных пучках (б), в конусных пучках при различных высотах осветителя и регистратора относительно базовой плоскости (в), в схеме освещения объекта структурированным светом в конусных пучках и регистрации изображения объекта в параллельных пучках (г), в схеме освещения объекта структурированным светом в параллельных пучках и регистрации изображения объекта в конусных пучках (д).

динат x , y , но уже зависит от продольной координаты z . Но главная особенность данной схемы состоит в том, что поверхности равной фазы также параллельны базовой плоскости, как и в предыдущем случае. Это означает, что все точки в плоскости (x, y) могут обрабатываться одинаково. В отличие от схемы в параллельных пучках, из рис. 5б видно, что масштаб изображения меняется в зависимости от высоты z , поэтому для восстановления истинной картины необходима операция трансформации координат по законам проективной оптики.

Здесь же отметим, что в схеме с конусными пучками очень важно, чтобы центры входных зрачков объективов проекционного и отображающего каналов находились на одном расстоянии от базовой плоскости. Если это условие не

выполняется, то, как видно из рис. 5в, изолинии постоянной фазы становятся изогнутыми и эффективная длина волны зависит не только от координаты z , но и от (x, y) .

Аналогичная картина с изогнутыми линиями равной фазы возникает и для двух оставшихся схем проекции и наблюдения полос, изображенных на рис. 5г, 5д.

Таким образом, только в схемах в параллельных и конусных пучках (рис. 5а и 5б) поверхности равной фазы представляют собой плоскости, параллельные базовой плоскости. Во всех остальных случаях на рис. 5в, 5г и 5д поверхность постоянной фазы не является плоскостью, что усложняет преобразование фазы в высоту при реконструкции формы поверхности трехмерного объекта. При таком распреде-

лении фазы требуется сложная процедура калибровки оптической системы для построения зависимости высоты объекта от фазы.

Самым простым случаем при преобразовании фазы в высоту является оптическая схема в параллельных пучках на рис. 5а, так как распределение фазы вдоль оси Z является линейным. Линейное распределение фазы позволяет использовать измерения фазы только в двух определенных по высоте точках для получения масштабных коэффициентов перевода радиан в единицы длины.

В оптической схеме в конусных пучках на рис. 5б распределение фазы вдоль оси Z является нелинейным, поэтому процедура калибровки усложняется, так как для построения зависимости высоты объекта от фазы требуется измерение фазы в нескольких определенных по высоте точках.

Если высота объекта превышает эффективную длину волны, то необходима операция сшивки фазы. Поэтому приведенный анализ можно также применять для выбора параметров оптической схемы, при которой можно проводить измерения без сшивки фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Takeda M., Mutoh K.* Fourier transforms profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes // *Appl. Opt.* 1983. V. 22(24). P. 3977–3982.
2. *Su X., Chen W.* Fourier transforms profilometry: a review // *Optics and Lasers in Engineering.* 2001. V. 35. P. 263–284.
3. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.