

ИММЕРСИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ

С.А.Александров, Л.В.Танин, А.С.Рубанов

При исследовании рельефа поверхностей голографическими методами довольно легко находится абсолютная величина высоты рельефа, а определение ее знака, т.е. направления рельефа, приближенность или удаленность данной анализируемой точки, вышуклости и вогнутости исследуемой поверхности, представляет собой довольно сложную, а в некоторых случаях и неразрешимую задачу.

Одним из возможных решений данной проблемы является применение иммерсионного метода оконтуривания, причем в качестве иммерсии используется поглощающая среда [1,2]. Однако эти методы довольно сложны, трудоемки и требуют применения лазеров с перестраиваемой длиной волны. Кроме того, они имеют недостаточно высокую точность определения высоты рельефа в более удаленных участках поверхности объекта в связи со значительным снижением контраста интерференционных полос на этих участках.

В данной работе для исследования высоты и направления рельефа поверхности предлагается в качестве иммерсии использовать оптически активные среды. Принципиальная оптическая схема реализации предлагаемого метода показана на рис. 1. Исследуемый объект *A* помещается в иммерсионную камеру *10*. Объект освещают плоской линейно поляризованной монохроматической волной, сформированной с помощью лазера *1*, телескопической системы *2*, поляризатора *3* и светоделителя *5*. Отраженную от объекта волну записывают на голограмму *8* с помощью двух пространственно разделенных и ортогонально поляризованных волн. Разворот плоскости поляризации одной из записывающих волн на 90° осуществляется в помощью пластинки $\lambda/2$ *7*. При этом сохраняется состояние поляризации объектных волн [3]. Во время первой экспозиции камеру *10* заполняют оптически нейтральной средой, а во время второй экспозиции — активной средой. Для формирования голографической топограммы с помощью лучей, почти нормальных к поверхности камеры *10*, используется телескопическая система, состоящая из объективов *11*, *12* и диафрагмы *13*. Поляризатор *9* служит для обеспечения общего направления колебаний двух восстановленных волн.

Введем прямоугольную систему координат таким образом, чтобы ось *Oy* совпала с направлением колебаний электрического вектора первой волны, прошедшей через оптически нейтральную среду (рис. 2). Распределение интенсивности в интерференционной картине, сформированной восстановленными волнами, будет иметь вид

$$I = a_1^2 \cos^2 \alpha + a_2^2 \cos^2(\theta - \alpha) + 2a_1 a_2 \cos \alpha \cos(\theta - \alpha) \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

где θ — угол поворота плоскости поляризации волны, прошедшей через оптически активную среду, относительно плоскости поляризации первой волны; α — угол поворота поляризатора относительно плоскости поляризации первой волны; $\Delta\varphi(x, y, z)$ — разность фаз.

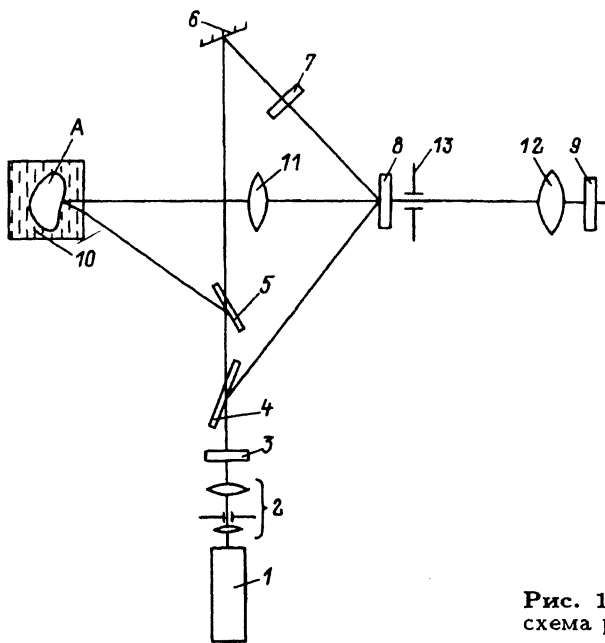


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема реализации метода.

Контраст (или видность) интерференционных полос равен

$$k = \frac{2a_1 a_2 \cos \alpha \cos(\theta - \alpha)}{a_1^2 \cos^2 \alpha + a_2^2 \cos^2(\theta - \alpha)}. \quad (2)$$

Следует отметить, что $\theta = \theta(x, y)$, так как различные участки объектной волны проходят различный путь в оптически активной среде в зависимости от рельефа исследуемой поверхности. При этом чем дальше удалены анализируемые точки поверхности, тем больше величина угла θ , а следовательно, при $\alpha = 0$ и $|\theta| < \pi/2$ тем ниже контраст интерференционных полос. Для достижения больших изменений контраста необходимо, чтобы исследуемая поверхность не изменяла состояние

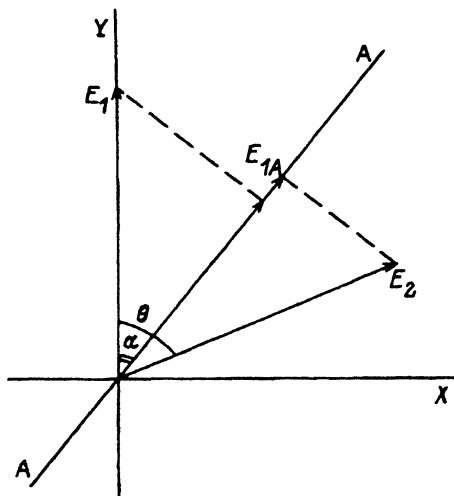


Рис. 2. Ориентация направлений колебаний объектных волн и анализатора.

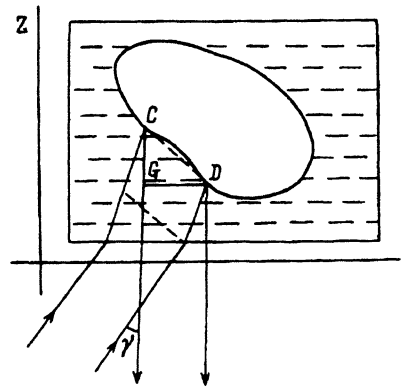


Рис. 3. Схема освещения и наблюдения исследуемого объекта.

поляризации освещающей волны. Таким образом, величина контраста интерференционных полос, как и в [1,2], позволяет определить направление рельефа. Однако в известных работах точность определения высоты рельефа в областях с низким контрастом значительно уменьшается. Предлагаемый метод позволяет избежать этого.

Развернем поляризатор ϑ на такой угол, чтобы для анализируемого участка интерференционной картины выполнялось соотношение

$$\alpha = \frac{\theta}{2}. \quad (3)$$

В этом случае контраст будет равен

$$k = \frac{2a_1 a_2}{a_1^2 + a_2^2}, \quad (4)$$

т.е. не зависит от величины угла θ и является максимально возможным для данных амплитуд a_1 и a_2 . При $a_1 = a_2$ $k = 1$.

Следовательно, добившись на анализируемом участке интерференционной картины максимального контраста интерференционных полос путем поворота поляризатора ϑ , можно измерить соответствующий угол поворота α и определить из (3) угол поворота плоскости поляризации волны θ . Пусть направление наблюдения будет перпендикулярно стенке камеры и составляет с направлением освещения угол γ (рис. 3). Разность хода в оптически активной среде для лучей, отраженных от точек C и D , принадлежащих исследуемой поверхности, будет равна

$$\Delta d = \Delta z \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right), \quad (5)$$

где $\Delta z = CG$ есть искомая высота рельефа в точке D относительно точки C , n — показатель преломления активной среды.

Как видно из (5), если $\gamma = 0$, то $\Delta d = 0$, т.е. происходит полная компенсация угла поворота плоскости поляризации в обратном ходе. Для всех других значений, т.е. когда $\gamma \neq 0$, $\Delta d \neq 0$.

При прохождении волной в оптически активной среде расстояния Δd ее плоскость поляризации развернется на угол $\Delta \alpha$

$$\Delta \alpha = gc \Delta z \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right), \quad (6)$$

где g — постоянная вращения, c — концентрация активной среды.

Пусть, например, для точек 1 и 2 с координатами X_1, Y_1, X_2, Y_2 углы θ_1 и θ_2 будут равны

$$\begin{aligned}\theta_1(X_1, Y_1) &= gc z_1(X_1, Y_1) \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right), \\ \theta_2(X_2, Y_2) &= gc z_2(X_2, Y_2) \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right),\end{aligned}\quad (7)$$

где z_1, z_2 — расстояния от анализируемых точек 1 и 2 до стенки камеры.

Получив максимальный контраст полос в окрестности точки 1, добьемся поворотом поляризатора ϑ максимального контраста полос в окрестности точки 2. При этом поляризатор повернется на угол $\Delta\alpha$, который, согласно (3) и (7), будет равен

$$\Delta\alpha = \pm \frac{1}{2} gc \Delta z \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right). \quad (8)$$

Величина этого угла определяет высоту рельефа, а направление поворота — направление изменения рельефа поверхности между точками 1 и 2. Высоту рельефа, как и в [2], определяем по интерференционной картине, а выражение (8) используем для определения направления рельефа. Если применяемая оптически активная среда “правая”, то в (8) необходимо поставить знак “плюс”, а если “левая” — “минус”. Например, если среда “правая”, а поляризатор ϑ для получения максимального контраста полос в окрестности анализируемой точки 2 необходимо повернуть влево, то, согласно (8), высота рельефа будет отрицательной. Следовательно, точка 2 более приближена к плоскости наблюдения, чем точка 1.

Таким образом, определение высоты рельефа осуществляется в отличие от известных методов [1,2] при максимальном контрасте интерференционных полос, а направление рельефа определяется по направлению поворота поляризатора.

Следует отметить, что из (6) можно непосредственно получать информацию о величине и направлении изменения высоты рельефа

$$\Delta z = \frac{\Delta\alpha}{gc \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma}} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Для реализации данного метода не требуется применение голографии, достаточно осветить исследуемую поверхность линейно поляризованной волной и наблюдать ее через поляризатор. Темные (светлые) полосы будут наблюдаться в тех точках поверхности, для которых $\Delta\alpha$ отличается на 180° . Знак в (9) выбирается так же, как и в (8).

Пусть, например, среда “правая”. При повороте поляризатора темные и светлые полосы начинают перемещаться, т.е. происходит как бы сканирование поверхности исследуемого объекта топографическими

линиями. Установим максимум или минимум освещенности в исходной точке C (рис. 3). Далее, развернем поляризатор таким образом, чтобы максимум (или минимум) освещенности из точки C переместился в анализируемую точку D . Если для этого поляризатор необходимо повернуть влево, то угол $\Delta\alpha$ отрицательный. Подставив измеренное значение $\Delta\alpha$ в формулу (9), определим величину и знак высоты рельефа в точке D , который будет отрицательным. Следовательно, точка D более приближена (на величину $\Delta z(D)$) к плоскости наблюдения, чем точка C .

Метод позволяет определить рельеф поверхности и фазовых объектов. В том случае когда исследуемый фазовый объект однороден и имеет плоскость симметрии, перпендикулярную падающему излучению, высоту и направление рельефа определяют по формуле

$$\Delta z = \pm \frac{\Delta\alpha}{2gc}. \quad (10)$$

При этом в отличие от известных интерференционных способов результат не зависит от величины показателя преломления исследуемого фазового объекта. Стенки камеры с активной средой также не влияют на результат измерений.

Таким образом, предложенный метод, выгодно отличаясь простотой реализации и нечувствительностью к внешним воздействиям (вибрациям и т.д.), в то же время позволяет решить проблему знака, т.е. определить как высоту, так и направление рельефа.

В том случае если исследуемая поверхность по своим свойствам аналогична шероховатой стеклянной поверхности, следует учитывать дополнительный поворот плоскости поляризации объектной волны при отражении от исследуемой поверхности [4].

Как видно из изложенного, применение в иммерсионных методах ооконтуривания оптически активных сред позволяет определять не только абсолютную величину высоты рельефа, но и его направление. При этом возможно значительно упростить процесс измерений, исключив запись голограмм, а также повысить точность определения рельефа по сравнению с методами, требующими использования поглощающих сред.

Список литературы

- [1] Рачковский Л.И., Танин Л.В., Рубанов А.С. // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. по голографии. Витебск, 1990. С. 157-158.
- [2] Rachkovsky L.I., Taniin L.V., Rubanov A.S. // Proc. SPIE/SPSE's 1991 Symp. on Electr. Imag.: Science and Technology. San Jose (USA), 1991. Vol. 1. P. 461.
- [3] Fournery M.E., Waggoner A.P., Mate K.V. // J. Opt. Soc. Am. 1968. Vol. 58. N 5. P. 701.
- [4] Рвачев В.П. Методы оптики светорассеивающих сред в физике и биологии. Минск, 1978. 240 с.

Институт физики им. Б.И. Степанова
Минск

Поступило в Редакцию
29 апреля 1993 г.
В окончательной редакции
22 июля 1993 г.