

07;12

©1992 г.

АБСОРБЦИОННЫЙ ДВУХДЛИНОВОЛНОВЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Л.В.Танин, Л.И.Рачковский

Голографическое оконтуривание является простым и удобным методом получения контурных карт объектов с произвольной формой. Существуют три возможности таких карт: многодлинноволновый метод, когда запись голограмм объекта производится в излучении лазера, содержащего несколько длин волн [1,2]; иммерсионный, при котором голограмма регистрируется, когда объект помещен в камеру [3], где между экспозициями изменяется показатель преломления; метод нескольких источников, когда при записи голограммы объекта используются два источника, разнесенных в пространстве [1].

В настоящей работе предлагается новый метод голографического оконтуривания, основанный на использовании поглощающих сред. Он позволяет определять абсолютный рельеф поверхности объекта, т.е. не только формировать интерференционные контуры на восстановленном изображении, но и устанавливать их абсолютное положение в пространстве. Это позволит устранить ошибки, возникающие при определении по одной интерферограмме формы объекта с произвольно чередующимися выпуклостями и вогнутостями.

Рассмотрим случай регистрации голограммы во встречных пучках (рис. 1). Объект помещается в иммерсионную среду с показателем преломления n_m и коэффициентом поглощения κ_m и освещается коллимированным пучком с длиной волн λ_m , где $m = 1, 2$. Будем считать, что регистрация двухэкспозиционной голограммы проводилась в линейном режиме, в этом случае голограмма восстанавливает две волны, амплитуды которых пропорциональны

$$A_m = R_m a_m e^{-i4\pi \frac{z}{\lambda_m} (n_m - i\kappa_m)}, \quad (1)$$

где R_m — коэффициент отражения поверхности; a_m — амплитуда волны, падающей на поглощающую среду для освещения объекта; z — расстояние от поверхности поглощающей среды до точки объекта.

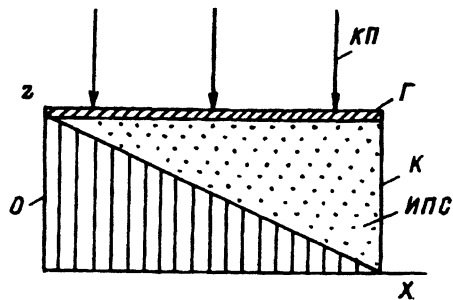


Рис. 1. Схема регистрации голограммы клиновидного объекта.

КП — коллимированный пучок, Г — голограмма, К — камера, ИПС — иммерсионная поглощающая среда, O — объект.

В результате сложения этих двух восстановленных волн получается интерференционная картина. Определим ее интенсивность, используя соотношение

$$I = (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*), \quad (2)$$

где звездочка обозначает комплексно-сопряженную величину.

После подстановки (1) в (2) получим

$$I = B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \left[4\pi z \left(\frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_2}{\lambda_2} \right) \right], \quad (3)$$

где $B_m = R_m a_m e^{-4\pi z \frac{\kappa_m}{\lambda_m}}$.

Глубинное расстояние Δz между полосами определяется из выражения (3), содержащего косинус, и равно

$$\Delta z = \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{n_1 n_2}}{2 \left| \frac{\lambda_2}{n_2} - \frac{\lambda_1}{n_1} \right|}. \quad (4)$$

Благодаря тому что среда поглощения, интенсивность интерференционных полос в максимумах и минимумах оказывается промодулированной. Вычислим контраст P интерференционной картины, характеризующей степень этой модуляции, воспользовавшись

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (5)$$

Максимальную I_{\max} и минимальную I_{\min} интенсивности получаем, когда косинус становится равным соответственно $+1$ и -1 . По формуле (5) после ряда математических преобразований получаем, что

$$P = \left[\operatorname{ch} \left(4\pi z \left(\frac{\kappa_1}{\lambda_1} - \frac{\kappa_2}{\lambda_2} \right) + \ln \frac{R_2 a_2}{R_1 a_1} \right) \right]^{-1}. \quad (6)$$

При $(R_2 a_2)/(R_1 a_1) = 1$ контраст монотонно падает с увеличением глубины поглощающегося слоя z . Это позволяет, регистрируя изменения контраста от полосы к полосе, определять их абсолютное глубинное положение относительно друг друга. Излучение лазера, проходя через среду, находящуюся в иммерсионной камере, частично поглощается, приводя к изменениям интенсивности в максимумах и минимумах интерференционной картины. Чем больше толщина поглощающего слоя между стеклом камеры и поверхностью объекта, тем больше поглощение и сильнее

падает величина контраста. Из формулы (6) также видно, что индикатриса рассеяния исследуемого объекта слабо влияет на контраст интерференционной картины, поскольку коэффициенты отражения поверхности на различных длинах волн относятся к одной и той же точке объекта.

Соотношения (4) и (6) описывают глубинный интервал и распределение контраста интерференционной картины, возникающей при оконтуривании объекта, помещенного в поглощающую иммерсионную среду. При этом из (4) следует, что глубинный интервал между полосами полностью определяется длинами волн, которые испускает лазер, и соответствующими им показателями преломления используемой иммерсионной среды.

Рассмотрим влияние ширины линии поглощения иммерсионной среды на контраст и глубинный интервал интерференционной картины. Обычно применяемая при оконтуривании разность длин волн находится в пределах от нескольких десятых до десятков нанометров, а получаемые глубинные интервалы между полосами лежат в интервале от 3 мкм до нескольких мм. При сопоставлении разности между длинами волн с шириной спектральной линии поглощающей среды можно рассмотреть два предельных случая.

Если линия поглощения достаточно узкая и коэффициент поглощения как функция длины волны изменяется достаточно быстро, то может быть, что $\kappa_1 \gg \kappa_2$, т.е. поглощение на одной из используемых длин волн намного больше, чем на другой длине волны. Тогда выражение (6) преобразуется к виду

$$P = \left[\operatorname{ch} 4\pi z \frac{\kappa_1}{\lambda_1} + \ln \frac{R_2 a_2}{R_1 a_1} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что величина контраста определяется только поглощением и длиной волны, соответствующими одной из экспозиций. Реализация этого случая возможна, когда в данном способе в качестве иммерсии применяются газообразные среды.

Когда при изменении длины волны от λ_1 до λ_2 коэффициент поглощения остается практически постоянным, то $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa$. Такие спектральные линии характерны для жидких сред, при этом показатель преломления также можно считать одинаковым для двух длин волн. Тогда с учетом (4) формула (6) упрощается до

$$P = \left[\operatorname{ch} \frac{4\pi z \kappa}{\Delta z} + \ln \frac{R_2 a_2}{R_1 a_1} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Сопоставление выражений (7) и (8) показывает, что для получения одинаковых значений глубинного расстояния и толщины поглощающего слоя, на которой контраст падает до минимальной регистрируемой величины, предпочтительными оказываются газовые среды, так как при этом величина коэффициента поглощения, входящая в (7), будет значительно меньше, чем соответствующая величина в (8). Это приводит к тому, что интенсивность интерференционной картины, определяемая выражением (3), будет по абсолютной величине больше, если объект помещен в газообразную иммерсию. С другой стороны, для газовой среды значительно сложнее согласовать длины волн излучения лазера с положением линии поглощения иммерсионной среды и областью сенсibilизации фотопластин, на которых регистрируется голограмма.

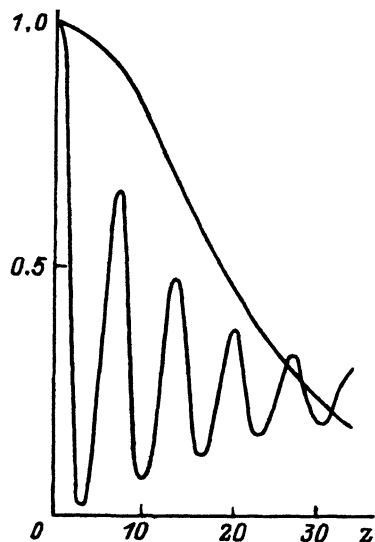


Рис. 2. Нормированное распределение интенсивности (1) и зависимость контраста (2) от толщины поглощающего слоя между объектом и голограммой.

Как уже упоминалось, глубинный интервал между полосами зависит от используемых длин волн и соответствующих им показателей преломления. Для определения показателя преломления можно воспользоваться соотношением [4]

$$n = 1 + c\lambda_0^3 N f \frac{\lambda - \lambda_0}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2}, \quad (9)$$

где c — постоянная, λ и $\Delta\lambda$ — длина волны центра полосы поглощения и ее ширина, N — концентрация частиц, f — сила осцилятора.

Это уравнение получено в предположении, что $\lambda - \lambda_0 \ll \Delta\lambda$, $x \ll 1$ и $n \approx 1$, и применимо для достаточно разреженного газа. Очевидно, что максимальный и минимальный показатели преломления соответствуют длинам волн на полувысоте линии поглощения. Более общее интегральное соотношение Крамерса-Кронига для дисперсионной зависимости [5] дает такое же положение длин волн для максимального и минимального показателей преломления на отдельной линии поглощения, однако его анализ более сложен. На вывод этого соотношения не накладывались какие-либо дополнительные ограничения, оно является следствием принципа причинности [6].

Если при определении глубинного интервала не учитывалась зависимость показателя преломления от длины волны, обусловленная линией поглощения, то при этом может возникать ошибка для заданного глубинного интервала. Ее величина определяется изменением показателя преломления. В жидких поглощающих средах при небольшой разности используемых длин волн это изменение не очень значительно и не приведет к большим погрешностям. Разность показателей преломления в газовой среде может быть много больше, если одна из длин волн находится на полувысоте линии поглощения, а вторая вдали от нее. В этом случае глубинный интервал, определенный без учета поглощения, будет отличаться от истинного, задаваемого дисперсионной зависимостью, на величину до $\pm 30\%$.

Оценка показывает, что различие глубинных расстояний между полосами в традиционном двухдлинноволновом методе и при использовании поглощающей среды можно использовать для регулировки чувствительности в пределах 60%. Это может быть полезно в случае, если используются лазерные источники, не позволяющие плавно перестраивать длину волны излучения.

Для иллюстрации возможностей предлагаемого метода приведем нормированное распределение интенсивности (кривая 1) и зависимость контраста (кривая 2) от толщины поглощающего слоя между объектом и голограммой (рис. 2), рассчитанные по формулам (3) и (6) для клиновидной поверхности (рис. 2). Для расчета выбраны следующие параметры (соответствующие парам натрия): $\lambda_1 = 0.5898$ мкм, $\kappa_1 = 0.004$, $n_1 = 1.004$, $\lambda_2 = 0.6200$ мкм, $\kappa_2 = 10^{-7}$, $n_2 = 1$, $R_1 a_1 = R_2 a_2$. Для простоты вычислений распределение интенсивности по сечению освещающих объект пучков полагалось однородным. Поскольку для определения абсолютного рельефа поверхности используется контраст интерференционной картины, то вид распределения интенсивности в предметных пучках не играет существенной роли.

Таким образом, проведенный расчет показал возможность определения абсолютного рельефа поверхности по расстоянию между контурными полосами и их контрасту. Для нумерации интерференционных полос посредством контраста предложено объект, помещенный в поглощающую среду, регулировать в излучении, содержащем две длины волны. Кроме того, для жидких и газовых поглощающих сред рассмотрено влияние ширины спектральной линии на глубинный интервал и контраст интерференционной картины.

Заключение

В данной работе предлагается новый метод голографического оконтуривания рельефа поверхности с использованием поглощающих сред. Метод позволяет определить абсолютный рельеф поверхности объектов. Проведено теоретическое рассмотрение возможностей метода, в частности, показано, что по изменению контраста интерференционной картины, возникающего в результате использования в качестве иммерсии поглощающей среды, определяется знак рельефа поверхности. Исследовано влияние ширины линии поглощения иммерсионной среды на контраст и глубинный интервал интерференционной картины.

Список литературы

- [1] Hildebrand B.P., Haines K.A. // Phys. Lett. 1966. Vol. 21. N 4. P. 422-423.
- [2] Hildebrand B.P., Haines K.A. // JOSA. 1967. Vol. 57. N 2. P. 155-162.
- [3] Tsuruta T., Shiotake N., Tsujiuschi J., Matsuda K. // Jap. J. Appl. Phys. 1967. Vol. 6. N 5. P. 661-662.
- [4] Унзольд А. // Физика звездных атмосфер. М., 1949. С. 163-166.
- [5] Науменко В.И. // Вестн. БГУ. 1980. № 232. С. 1-30.
- [6] Toll J.S. // Phys. Rev. 1956. Vol. 104. N 6. P. 1760-1770.