

эти ограничения снимаются [2]. Экспериментально исследовалась зависимость глубины локализации интерференционной картины от периода интерференционных полос, получаемых с голограммы. Голограммы записывались по схеме Цендера—Маха. В одной из ветвей перед зеркалом располагался рассеиватель. Угловой размер рассеивателя равен 0.05. На рис. 2 приведен теоретический график зависимости l_k от периода p (выражение (9)) (l_k и p даны в мм) и экспериментальные точки, полученные для разных углов разворота плоского зеркала между экспозициями (на зеркале, очевидно, находится ось взаимного разворота изображений рассеивателя). В плоскости параллельной плоскости зеркала наблюдалось 11 контрастных полос, что хорошо согласуется с выражением (8).

Таким образом, эксперимент полностью подтвердил сделанные выводы по расчету видности и глубины локализации интерференционных полос.

Автор благодарен В. А. Комиссаруку за ценные советы и обсуждение результатов работы.

Литература

- [1] И. С. Зейликович, В. А. Комиссарук. Оптическая голография и ее применение. ЛДНТП, Л, 1974.
- [2] И. С. Зейликович, В. А. Комиссарук. Опт. и спектр., 39, 985, 1975.
- [3] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1970.

Поступило в Редакцию 6 августа 1976 г.

УДК 535.41

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Н. Г. Власов и А. Е. Штанько

В последние годы сформировалось новое направление в интерферометрии (speckle interferometry), основанное на пространственной корреляции интенсивности диффузно-когерентного излучения. По сравнению с голографической интерферометрией одним из достоинств указанного направления является существенное снижение требований к когерентности источников освещающего излучения. Так, в [1, 2] было отмечено, что в качестве источников могут применяться лазеры, работающие в многомодовом режиме и соответственно обладающие значительно большей мощностью по сравнению с одноמודовыми. Однако конкретных оценок минимальной степени когерентности освещающего излучения, достаточной для получения интерферограмм методами спекл-интерферометрии, до настоящего времени не производилось. В данном сообщении рассмотрены требования к когерентности освещающего излучения, показано, что в качестве источников могут применяться обычные источники теплового излучения, например лампы накаливания, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие полученные выводы.

Традиционная схема, применяемая в спекл-интерферометрии при сравнении двух различных состояний исследуемого объекта методом двух экспозиций, имеет следующий вид (см. рисунок). Поверхность диффузно отражающего объекта 1 освещается источником 2 и фотографируется с помощью объектива 3 на фотопластинку 4, причем объектив 3 дифрагируется или обычной круговой диафрагмой 5 [1], или диафрагмой 6, содержащей два круговых или щелевых отверстия [2, 3]. В последнем случае в плоскости изображения возникает несущая пространственная частота, позволяющая получать максимальный контраст интерференционных полос на восстановленном изображении. При исследовании прозрачных фазовых объектов 1 замечается на матовое стекло, источник 2 помещается в положение 2', а сам объект — между матовым стеклом и объективом 3.

Рассмотрим теперь условия, при выполнении которых в плоскости изображения наблюдается спекл-эффект, необходимый для данного вида интерференционных измерений. В когерентном лазерном излучении для его образования достаточно, чтобы вариации оптического пути на поверхностной микроструктуре равнялись или превосходили длину волны [4], а сама микроструктура не разрешалась оптической системой. При переходе к излучению тепловых источников необходимо удовлетворить некоторые требования, предъявляемые к когерентности освещающего волнового поля.

Требования к пространственной когерентности можно вывести, исходя из простых физических соображений. В оптической системе, преобразующей объект, происходит усреднение отраженного волнового поля по элементу разрешения оптической системы в первом приближении по диску Эйри. Для того чтобы такое усреднение происходило когерентно, область когерентности освещающего источника на поверхности объекта (или на матовом стекле в случае прозрачного фазового объекта) должна разрешаться оптической системой. Как известно [5], диаметр области когерентности равен $0.16\lambda/\alpha_n$, где λ — средняя длина волны, α_n — угловой радиус источника; разрешение оптической системы равно $0.61\lambda/\alpha_0$, где α_0 — числовая апертура оптической системы. Следовательно, требования к пространственной когерентности заключаются в том, чтобы $\alpha_0 > 3.8\alpha_n$, что нетрудно выполнить экспериментально без существенной потери интенсивности освещающего излучения. Требования к временной когерентности также могут быть найдены из условия когерентного усреднения волновых полей по диску Эйри. При направлении освещения и фотографировании, близких к нормали к поверхности, длина когерентности должна превышать среднеквадратичную высоту микроструктуры поверхности, а при наклонном освещении и фотографировании она должна превышать разность хода, возникающую между волновыми полями, отраженными от противоположных концов элемента разрешения оптической системы, отнесенного к поверхности объекта. Очевидно, при фотографической регистрации эффективная длина когерентности определяется не только полихроматическим волновым полем, но и спектральной селективностью приемника излучения — фотопластинки. Соответствующий расчет и эксперимент показали, что если использовать фотопластинки, предназначенные для работы с лазерным излучением и соответственно сенсibilизированные в достаточно узком спектральном диапазоне, то, используя обычные фотообъективы без светофильтров, становится возможным исследовать металлические объекты с грубо обработанной поверхностью и линейными размерами до 60 см.

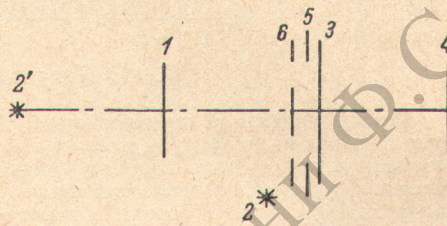


Схема записи спекл-интерферограмм.

Для излучения с ограниченной когерентностью спекл-структура в пространстве изображений существует только в непосредственной близости от изображения поверхности объекта, и глубина зарегистрированной сцены определяется условием пересечения спекл-структуры с фотоэмульсией. Если плоскость фотоэмульсии оптически сопряжена с серединой сцены, то ее глубина, зарегистрированная в пространстве изображений, равна $Nl+h$, где N — число зерен спекл-структуры вдоль оси оптической системы, зависящее от временной и пространственной когерентности излучения, а также от характеристик оптической системы, l — средний продольный размер зерна спекл-структуры, h — толщина фотоэмульсии. Зная продольный размер l [4] и уменьшение оптической системы, можно определить глубину зарегистрированной сцены и в пространстве предметов.

В эксперименте сначала были получены негативы объектов — транспарантов на фотопластинках типа 8E75 Агфа-Геверт без применения светофильтров. Как известно, негатив, полученный в диффузно-когерентном излучении, способен восстанавливать позитивное изображение. Такими же свойствами обладали и негативы полупрозрачных транспарантов, полученные при выполнении обесцененных выше условий. Объект освещался через матовое стекло обычной лампой накаливания и фотографировался через круговую апертуру и через апертуру, диафрагмированную экраном с двумя круговыми или щелевыми отверстиями. В последнем случае, как и в когерентном лазерном излучении, возникла несущая пространственная частота [2, 3], обеспечивающая восстановление ярких позитивных изображений в узком диапазоне направлений, определяемом углами дифракции восстанавливающего излучения. По сравнению с задисью в когерентном излучении качество восстановленного изображения было выше благодаря отсутствию шума, обусловленного дифракцией на пылинках и других дефектах оптической системы.

Существенно, что интерференционные методы, развитые в диффузно-когерентном излучении на основе пространственной корреляции интенсивности, могут быть осуществлены в полихроматическом излучении тепловых источников. Такая возможность была подтверждена прямыми экспериментами. Интерферограммы диффузно-отражающих объектов были получены по схеме рисунка методом двукратной экспозиции с приложением к объекту между экспозициями деформирующей нагрузки, причем фотографирование производилось как с круговой, так и с частично заполненной апертурой, объективом Индустар-61 с относительным отверстием 1 : 5.6 и двадцатикратном уменьшении. Источником излучения служила лампа накаливания, светофильтры отсутствовали. Размеры зарегистрированной сцены составляли $60 \times 60 \times 10$ см (глубина зарегистрированной сцены показывает, что когерентность освещающего волнового поля была достаточной для образования вблизи изображения поверхности объекта нескольких зерен спекл-структуры, направленных вдоль оптической оси).

Таким образом, показана возможность развития методов спекл-интерферометрии, основанных на использовании источников теплового излучения, что позволяет проводить интерференционные измерения в широком спектральном диапазоне, не ограниченном имеющимися источниками лазерного излучения.

Литература

- [1] E. Archbold, A. E. Ennos. Opt. Acta, 19, 253, 1972.
- [2] Н. Г. Власов, Ю. П. Пресняков. В сб.: Оптическая голография, 51. ЛДНТП, Л., 1972.
- [3] D. E. Duffy. Appl. Opt., 11, 1178, 1972.
- [4] H. Fujii, T. Asakura. Opt. Commun., 11, 35, 1974.
- [5] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1973.

Поступило в Редакцию 27 сентября 1976 г.

УДК 533.9.082.5.07

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В МЕТОДАХ «ЛОКАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ» ПЛАЗМЫ

В. П. Козлов и Л. А. Луизова

Методы локальной спектроскопии, т. е. определения коэффициентов излучения и поглощения неоднородной плазмы в данной точке пространства, широко разрабатываются для источников света, обладающих осевой симметрией. В этом случае принципиально устанавливается однозначная связь между распределением спектральной энергетической яркости поверхности источника $b(\lambda, x)$ вдоль направления x , перпендикулярного оси источника и оси наблюдения, и радиальным распределением «коэффициента излучения» $\varepsilon(\lambda, r)$, величины, пропорциональной мощности спонтанного излучения единицы объема плазмы [1],

$$b(\lambda, x) = 2 \int_x^{r_0} \frac{\varepsilon(\lambda, r) r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (1)$$

r_0 — радиус границы источника.

Для упрощения рассуждений мы будем рассматривать ниже случай оптически «тонкой» неоднородной плазмы, для которой справедливо соотношение (1), хотя нет принципиальных препятствий к обобщению сделанных ниже выводов на все методы локальной спектроскопии, применимые к плазме произвольной оптической толщины [2-4].

Решение интегрального уравнения (1) при экспериментально определенной функции $b(x)$ представляет собой типичную «некорректную» задачу [5], поэтому неудивительно, что большое число работ посвящено изложению различных вычислительных алгоритмов нахождения искомого распределения $\varepsilon(r)$. Устойчивость решения к случайным погрешностям эксперимента достигается либо за счет описания искомых функций кривыми, определяемыми небольшим числом параметров [3, 6, 7], либо за счет предварительного «сглаживания» экспериментальных кривых [8], либо за счет использования априорной информации о «гладкости» искомой функции [9].

Экспериментатор, поставленный перед необходимостью выбрать наилучший метод обработки своих результатов, не имея объективных критериев качества алгоритма, часто действует на основе непринципиальных соображений. Такой подход может иногда привести, если не к ошибочным результатам, то, во всяком случае, к неоправданной потере машинного и рабочего времени.

Например, видно, что радиальные распределения, полученные в работе [9], могут быть в пределах погрешностей их определения описаны двухпараметрическими кривыми, поэтому в этом случае сложной математической обработки результатов можно было бы избежать. Но при более «точных» измерениях неоправданное использование упрощенных методов обработки [6] может привести к потере полезной информации об объекте исследования.

Поэтому естественно возникает вопрос: сколько независимых параметров, характеризующих состояние объекта исследования (в нашем случае функцию $\varepsilon(r)$), можно определить в данном эксперименте, т. е. при условии, что выполнены измерения $b(x)$ в определенном числе точек x и известна точность измерения.

Для ответа на поставленный вопрос необходимо знать не только свойства измерительной системы, но и четко представлять себе, какими сведениями об объекте исследования мы располагаем. Если нет почти никакой информации об $\varepsilon(r)$, то приходится использовать модель «дискретных слоев» [3, 4]. Оценка точности определения параметров модели основана, как известно, на анализе информационной матрицы Фишера [11, 14], однако элементы ее могут быть вычислены лишь после задания числа слоев и положений их границ, таким образом, подбор рациональной модели приходится вести методом «проб и ошибок».