

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

© ОПТИКА АСТА, 1969.

УДК 621.378.9 : 778 : 4

Ж.-Ш. ВЬЕНО

(Безансон)

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКЛ-СТРУКТУР ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВИБРАЦИЙ И СИНТЕЗИРОВАННЫХ АПЕРТУР

Введение. Фаза волны, рассеянной диффузной поверхностью при когерентном освещении, случайна. В результате наблюдается хорошо известное явление зернистости рассеянного поля (спекл-структура). В [1—3] исследовались статистические свойства спекл-структур. Различные применения этого явления приведены в [4—18].

Предлагаемая работа преследует две цели: 1) показать возможность применения диффузных волн для визуализации модуля оптической передаточной функции синтезированных апертур; 2) показать, что, выбирая определенным образом контур освещаемой области на диффузной поверхности, можно получить методом двойной экспозиции интерференционную картину, средняя интенсивность которой постоянна на большой площади. Из этих результатов можно вывести частное приближение для случая изучения вибраций. Техника спекл-структур позволяет определить моды вибраций любой диффузной поверхности, однако получение количественных распределений амплитуд вибраций затруднено. Моды вибраций можно определить методом пространственной фильтрации применительно к спекл-структуре. Этот способ позволяет измерить углы поворота элементов поверхности, близких к узловым областям.

Визуализация частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) синтезированной апертуры. Пусть имеется диффузная поверхность D , состоящая из случайно распределенных диффузных рассеивателей с одинаковым средним коэффициентом рассеяния (рис. 1). Обозначения ясны из рисунка.

В некоторой плоскости наблюдения $O'\xi\eta$, параллельной Oxy , распределение амплитуды рассеянной волны пропорционально Фурье-преобразованию комплексной амплитуды в плоскости Oxy . Энергия распределения $E(\xi, \eta)$ есть квадрат модуля амплитуды. Она складывается из двух составляющих: средней величины $\bar{E}(\xi, \eta)$ и флуктуаций вокруг этого значения $\tilde{E}(\xi, \eta)$. Основные ступени вычисления сводятся к следующему.

Энергия в спекл-структуре:

$$E(\xi, \eta) = \bar{E}(\xi, \eta) + \tilde{E}(\xi, \eta).$$

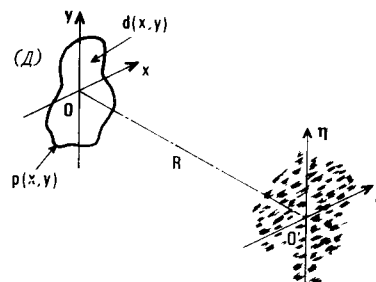
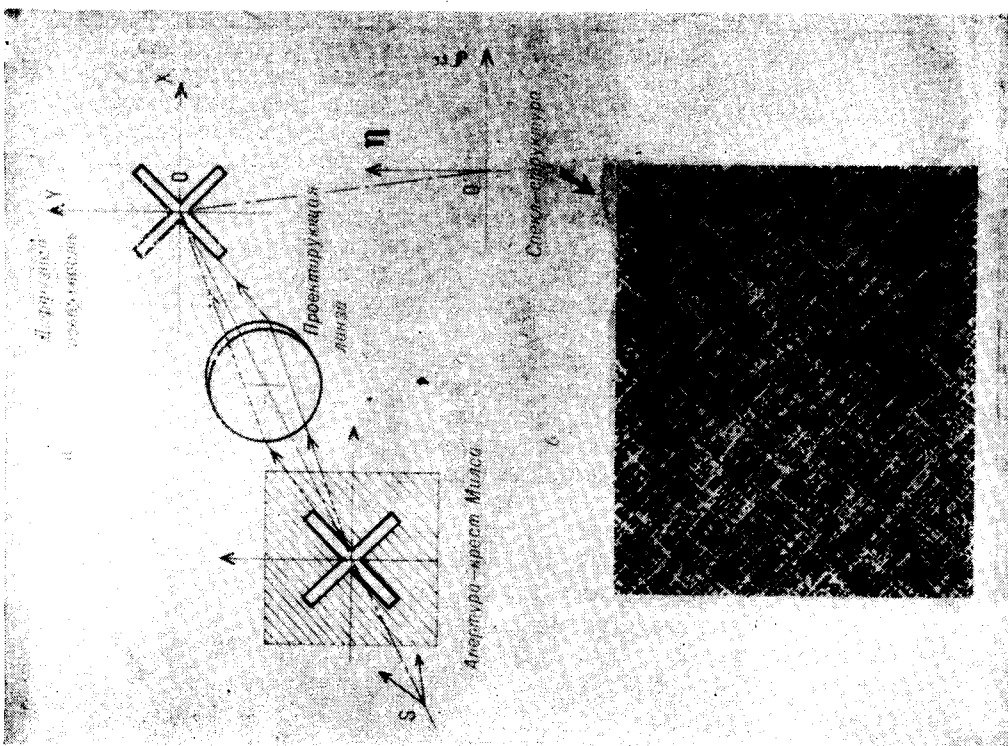
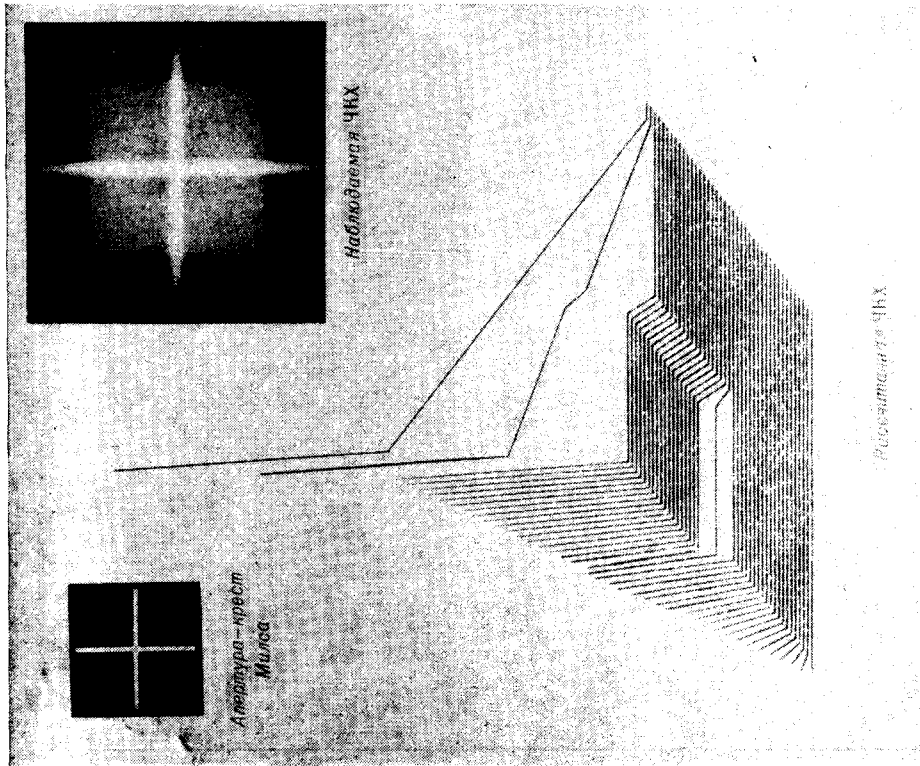


Рис. 1.



Согласно Голдфишеру, $\tilde{E}(\xi, \eta) * \bar{E}(\xi, \eta) \propto F[p(x, y) * p(x, y)]$, если функция зрачка $f(x, y) = p(x, y)d(x, y)$, где $p(x, y) = 1$ внутри контура и $p(x, y) = 0$ вне его.

Пропускание негатива спекл-структуры:

$$t(\xi, \eta) = a + b[E(\xi, \eta)] \quad (a, b \text{ — параметры}).$$

Спектральное распределение амплитуд:

$$T(\omega, \nu) = F[t(\xi, \eta)] = a'\delta(\omega, \nu) + bF[E(\xi, \eta)].$$

Интенсивность:

$$I(\omega, \nu) = A\delta(\omega, \nu) + BF[\tilde{E} * \bar{E}].$$

Тогда $I(\omega, \nu) \propto p(x, y) * p(x, y)$ и $I(\omega, \nu) \propto$ ЧКХ апертуры $p(x, y)$.

Отметим, что интенсивность в спектре $I(\omega, \nu)$ пропорциональна оптической передаточной функции безабберационной системы с постоянным пропусканием, ограниченной зрачком $p(x, y)$.

Таким образом, получаем простой метод определения частотно-контрастной характеристики заданного зрачка. Исходя из опыта, который мы имели по теоретическому и экспериментальному изучению ЧКХ различных синтезированных апертур, рассмотрим в качестве примера зрачок в форме взаимно перпендикулярных щелей. В литературе такая апертура известна под названием креста Милса.

Эксперимент заключается в записи спекл-структуры от однородной диффузной поверхности, ограниченной исследуемым зрачком. После этого наблюдается спектр полученного негативного транспаранта. Форма зрачка определяет статистические характеристики спекл-структур (рис. 2). На рис. 3 и 4 показаны фотографии распределения интенсивности в спектре спекл-структур, т. е. изображения ЧКХ.

Измерение углов наклона. На одной фотографической пластине запишем две или более спекл-структуры, соответствующие различным положениям диффузной поверхности. Подобная ситуация имеет место в двух- или многоэкспозиционной голографической интерферометрии. В результате получаем суперпозицию идентичных спекл-структур, смещенных в пространстве и во времени. Это справедливо, если смещения поверхности малы. Таким является случай вибраций, когда углы наклона элементарных участков поверхности незначительны. Если $m(\xi, \eta)$ описывает смещение, то новое распределение интенсивности является сверткой между m и амплитудным пропусканием, определенным ранее.

Найдем снова функцию $I(\omega, \nu)$, представляющую собой интенсивность в Фурье-спектре спекл-структуры, но промодулированную функцией, описывающей явление интерференции*. Периодичность и вид полос зависят от формы функции $m(\xi, \eta)$. Можно указать, что такой подход приводит к фундаментальной концепции гомологических лучей в голографической интерферометрии [7].

Предположим, что мы хотим за время между двумя экспозициями измерить с большой точностью угол наклона движущейся поверхности. При этом необходимо, чтобы полосы не искажались ЧКХ зрачка. В этом случае лучшей апертурой является та, автокорреляционная функция которой постоянна в поперечном направлении. Очевидно, что это не круглая апертура. Рис. 5 иллюстрирует наше утверждение.

Для диффузной поверхности в случае синусоидальных вибраций функция $m(\xi, \eta)$ может быть вычислена (рис. 6, а—б). Рис. 6, б отображает вероятность присутствия точки Q поверхности в положении $(\xi, 0)$. Можно сказать, что он показывает, как долго спекл-структура занимает данное положение. В результате полосы от вибраций m определяются Фурье-преобразованием.

* Это явление наблюдается, если волны рассеиваются одной и той же поверхностью и степень автокорреляции отлична от нуля. Видимые полосы появляются, если соответствующие зерна частично перекрываются.

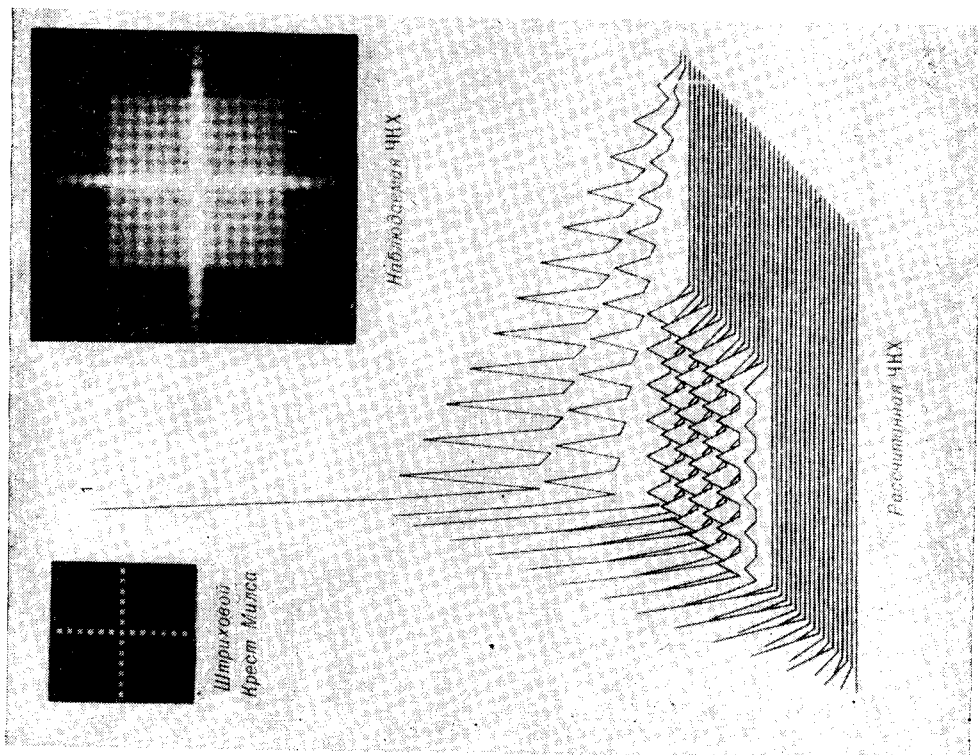


Рис. 4.

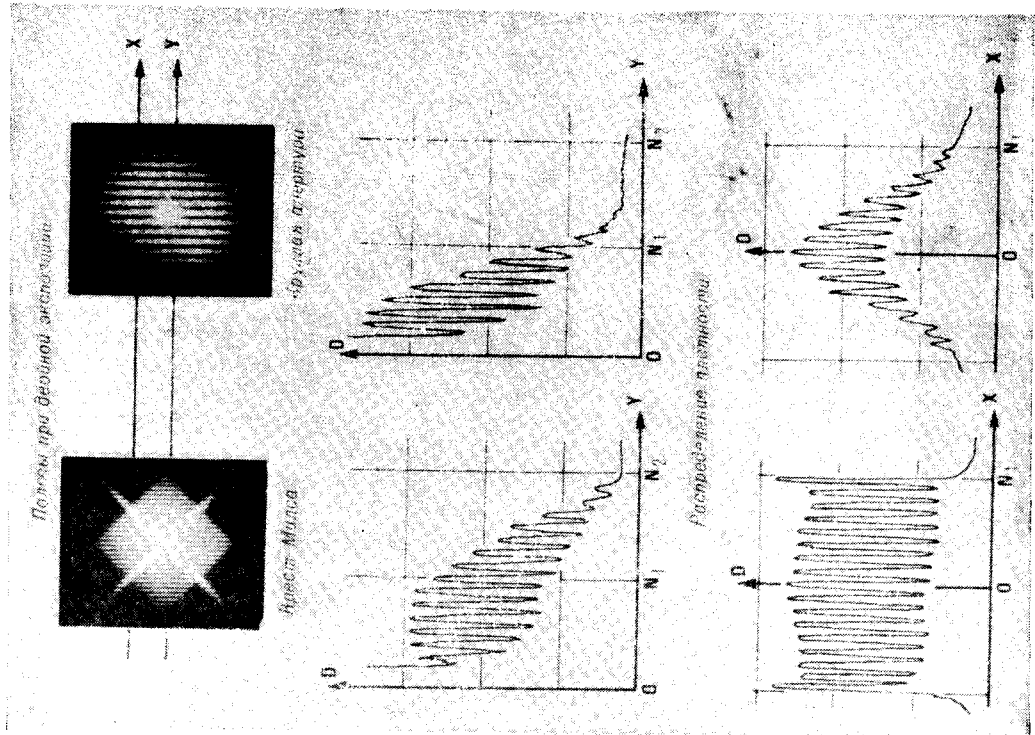


Рис. 5.

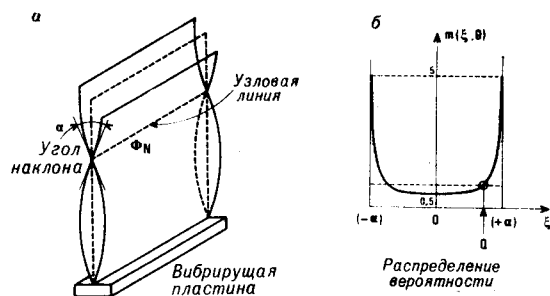


Рис. 6.

Теоретические и экспериментальные кривые представлены на рис. 7. Максимальный угол наклона составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ рад в окрестностях узловой линии металлической пластины ($300 \times 200 \times 2$ мм), вибрирующей с частотой 430 Гц (диффузный участок ограничен крестом Милса, длина которого 20 мм). Разрешающая способность эмульсии и апертура камеры ограничивают диапазон измерения от 10^{-2} до 10^{-7} рад.

Определение мод вибраций диффузных объектов. Свойства усредненной во времени спекл-структуры. Метод усреднения в голографической интерферометрии позволяет определить как конфигурацию мод вибраций, так и амплитуду вибраций в любой точке исследуемой поверхности. Техника спекл-структур обычно позволяет сделать качественную оценку параметров, которые определяют моды вибраций.

В этом разделе мы опишем метод записи и обработки усредненных во времени спекл-структур, позволяющий получить количественную информацию о модах и амплитудах вибраций в различных частях объекта (металлическая пластинка $300 \times 200 \times 2$ мм возбуждалась акустическим преобразователем: использовался громкоговоритель, работающий на

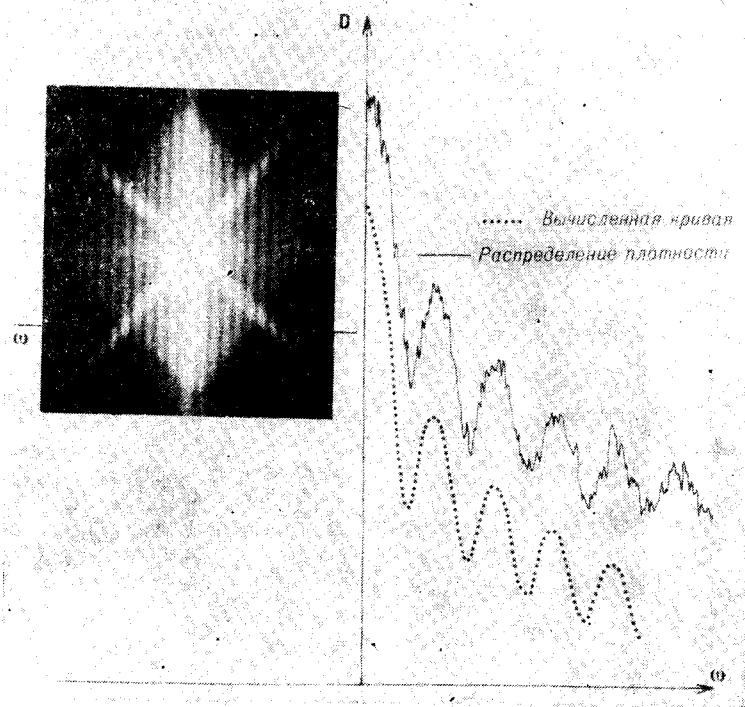


Рис. 7.

частоте несколько сот герц). Метод состоит в получении распределения вибраций на исследуемой поверхности, причем основные данные извлекаются из фотографической записи спекл-структуры с помощью соответствующей пространственной фильтрации. В этом случае мы измеряем углы наклона диффузных элементов, расположенных в непосредственной близости к узловым линиям. Оценка максимальных амплитуд следует из измерения.

Можно использовать три способа записи спекл-структур: 1) следуя [6], регистрируется спекл-структура в ближнем поле когерентно-освещенной диффузной поверхности; 2) согласно [4], между источником и объектом помещается диффузный рассеиватель; при этом спекл-структура меняется в зависимости от вибраций элементов объекта; 3) в Национальной физической лаборатории (Англия) записывают интерферограммы, наблюдаемые при суперпозиции спекл-структуры с когерентным фоном [10]. Мы использовали первый способ, который схематически

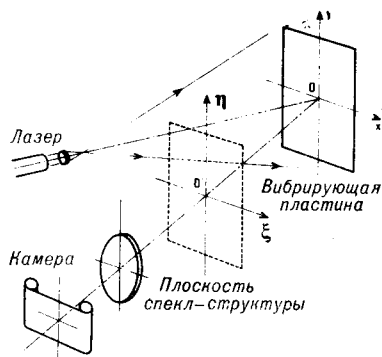


Рис. 8.

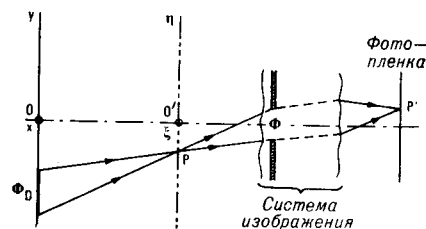


Рис. 9.

представлен на рис. 8. Основные геометрические соотношения показаны на рис. 9: две точки P и P' являются сопряженными. Диффузный элемент размером Φ_D соответствует энергии в точке P' на пленке. Вклад Φ_D в точку P , а следовательно, и в интенсивность в точке P' зависит от вида движения элемента Φ_D . Любое вращение Φ_D приводит к поперечному сдвигу зерна вокруг точки P , а также P' на пленке. Важно, что эта нерезкость спекл-структуры связана с углом наклона элемента Φ_D . Например, если вся пластина колеблется синусоидально вокруг оси, лежащей в ее плоскости без каких-либо деформаций (рис. 10, а), то все элементы Φ_D поворачиваются на одинаковый угол и все точки, подобные P' , смещаются на ту же самую величину. С другой стороны, если имеется деформация, различные элементы поворачиваются на разные углы, меняющиеся от нуля в линии пучности до максимума в узловой линии (см. рис. 10, б). В простейшем случае полосы связаны с одним возможным направлением оси вращения. Наоборот, выбор определенного направления в дифракционной плоскости позволяет получить группу диффузных элементов Φ_D , которые вращаются вокруг параллельных осей. Практически для анализа мод вибраций с помощью спекл-структур необходимо использовать пространственный фильтр.

Получение информации с помощью пространственной фильтрации. Способ выделения заданного направления в Фурье-спектре хорошо известен (рис. 11). Щель S помещена в плоскость Фурье первой линзы L_1 по направлению ω . С помощью маски M убираются низкочастотные составляющие, т. е. фон. Вибрирующая пластина, взятая в качестве источника спекл-структуры, расположена во входной плоскости системы. Пространственный фильтр (S, M) передает информацию только о тех диффузных элементах, которые вращались вокруг осей, параллельных

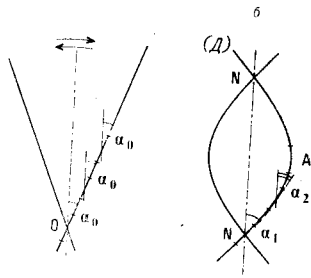


Рис. 10.

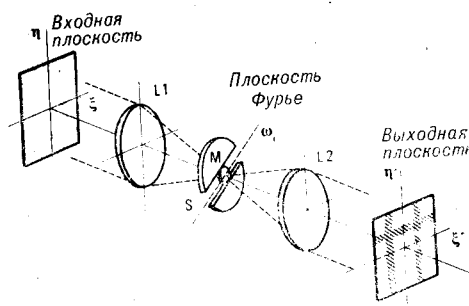


Рис. 11.

направлению ω . Восстановленные изображения, которые приведены на рис. 12 для трех направлений щели, показывают моды пластины, vibrating с частотой 430 Гц. Как и следовало ожидать, наблюдаются три различные конфигурации. Три верхние картины (а) получены с одной-миллиметровой щелью, в центре (б) — со щелью в 10 раз шире. Однако функция рассеяния щели не пренебрежимо мала. Мы полагали, что

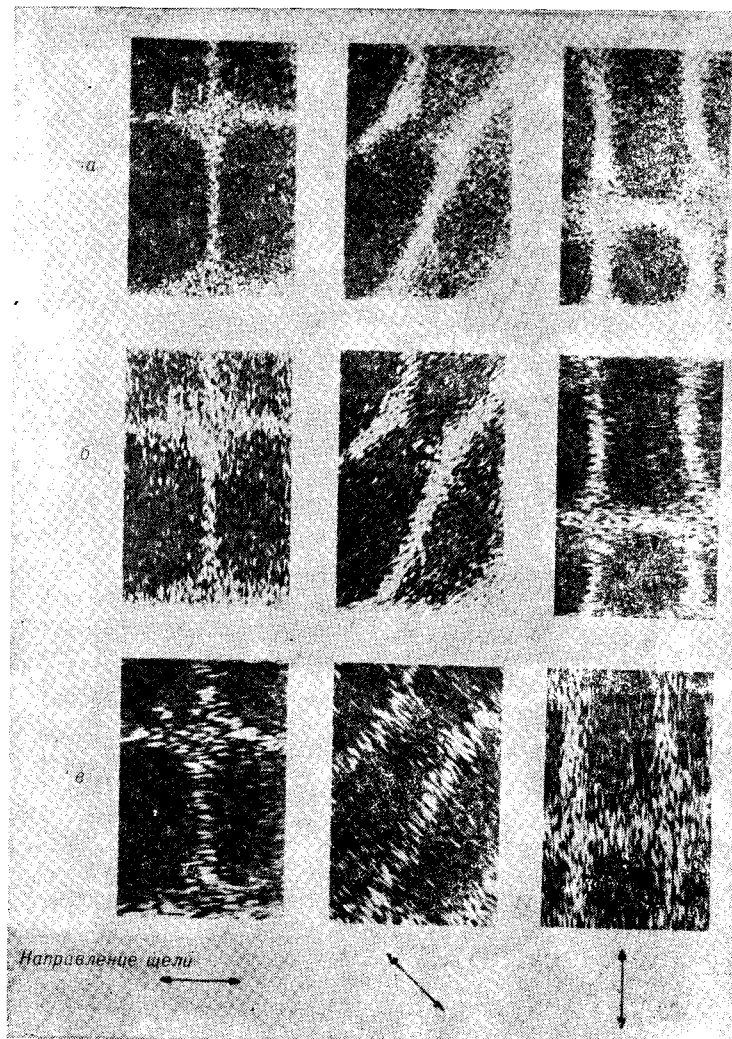


Рис. 12.

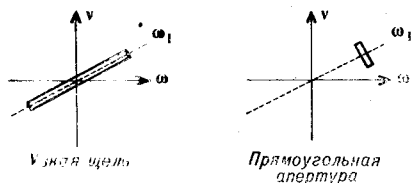


Рис. 13.

лучше наблюдать полосы, параллельные осям вращения диффузных элементов (см. рис. 12, в). Это достигается заменой первоначальной фильтрующей щели маленькой прямоугольной апертурой, продольный размер которой перпендикулярен к ω (рис. 13). Наконец, считая кольцевую апертуру эквивалентной бесконечному числу малых

прямоугольных апертур, перпендикулярных к радиусу, можно использовать зрачок в виде кольца как фильтр, способный визуализировать одновременно каждое направление оси вращения, соответст-

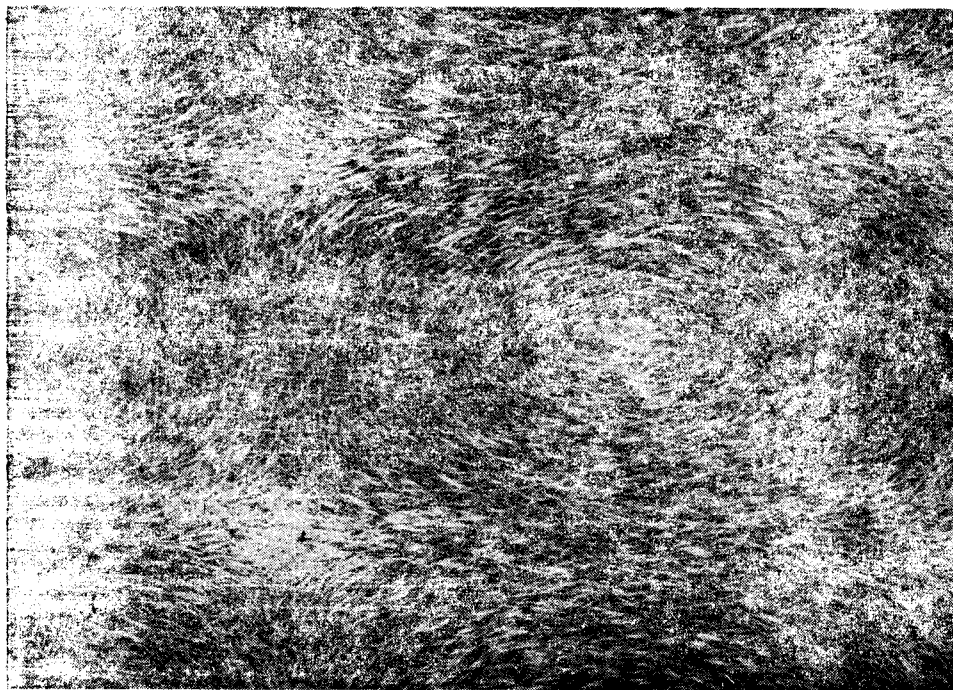


Рис. 14.

вующее любому диффузному элементу. На рис. 14 показано использование кольцевого фильтра. Видна область пучности в центре с четырьмя седлообразными участками вокруг. Определение углов наклона, как объяснялось в предыдущем разделе, полностью исчерпывает количественную сторону метода.

ВЫВОДЫ

Статистические свойства спекл-структур позволяют непосредственно визуализировать оптическую передаточную функцию любого заданного зрачка: распределение интенсивности в дифракционной картине пропорционально автокорреляционной функции контура зрачка, ограничивающего диффузную поверхность. Представлены соответствующие примеры.

Показано использование спекл-структур для изучения поворотов диффузных объектов, углы наклона которых определяются с помощью двухэкспозиционной фотографической записи. В случае механических вибраций амплитуды смещений оценивались методом временного усреднения.

Количественное описание мод вибраций может быть получено с помощью согласованных пространственных фильтров, определяющих изменения спекл-структуры во время смещения диффузных элементов. Условия эксперимента не такие жесткие, как в голографии. Единственное требование — достаточно надежная фильтрация.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. I. Goldfisher. J. Opt. Soc. Am., march 1965, v. 55, pp. 247—253.
2. H. H. Hopkins and H. Tiziani. Proc. of the Int. Symp. on the Appl. of Holography. Besançon 1970 (viii) ed. by J. Ch. Viénot & al.
3. S. Lowenthal, H. Arsenault, D. Joyeux. Proc. of the Int. Symp. on the Appl. of Holography. Besançon 1970 (2.2) ed. by J. Ch. Viénot & al.
4. B. Eliasson and F. M. Mottier. J. Opt. Soc. Am., 1971, v. 61, p. 559.
5. A. Caron. Thèse de 3^{ème} cycle. Besançon 1971, Pupilles synthétiques en lumière spatialement incohérente, correction des images au moyen de fonctions particulières.
6. G. A. Massey, Nasa Rept. № 68—14070 (1968), Nat. Technical Information Service, Springfield, Va. 22151, Study of vibration measurement by laser methods.
7. J. Ch. Viénot, C. Froehly, J. Monneret and J. Pasteur. Proc. of the Symposium on the Engineering Uses of Holography, Glasgow 1968 ed. by E. R. Robertson & al, Cambridge University Press, 1970.
8. C. Froehly, J. Monneret, J. Pasteur and J. Ch. Viénot. Symposium on Applications of coherent light, Florence sept. 1968 and Optica Acta, v. 16, № 3, p. 343—362, 1969.
9. J. Monneret. Thèse de Doctorat d'Etat 1973.
10. E. Archbold, J. M. Burch, A. E. Ennos and P. A. Taylor. Nature, 1969, v. 222, p. 263.
11. J. N. Butters and J. A. Leendertz. Optics and Laser Technology, feb. 1971, v. 3, p. 26.
12. L. Ek, N. E. Molin. Opt. Comm., 1971, v. 2, p. 9.
13. N. Fernelius, C. Tome. J. Appl. Phys. 1970, v. 2, p. 2252.
14. J. A. Leendertz. J. Sc. Instruments, 1970, v. 3, p. 214 and Proc. of the Conference 100 on Optical Instruments and Techniques, Reading 1969, ed. by J. M. Dickson, Oriel Press, p. 256.
15. S. Debrus, M. Francon and M. May. Proc. of the Conference 100 on Optical Instruments and Techniques, Reading 1969, ed. by J. M. Dickson, Oriel Press, p. 318.
16. E. Archbold, A. E. Ennos. Optica Acta, 1972, v. 19, № 4, pp. 253—271.
17. H. J. Tiziani. Optica Acta, 1971, v. 18, pp. 891—902.
18. M. E. Guillaume. Thèse de 3^{ème} cycle. Besançon 1972, Contribut on à l'étude d'une onde cohérente diffusée et à la détermination optique des modes de vibration de systèmes mécaniques.

Поступила в редакцию 16 апреля 1973 г.

УДК 621.378.9 : 778 : 4

А. М. ВАСИЛЬЕВ, С. Т. ДЕ, А. В. ЛОГИНОВ,
Ю. Н. СОЛОДКИН
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Необходимость исследования вибрационных характеристик объектов связана с тем, что эти характеристики позволяют оценить прочность и надежность механических конструкций в условиях эксплуатации. Под вибрационными характеристиками понимаются собственные частоты и формы колебаний объектов, а также распределение ампли-