

УСТРОЙСТВА ВОСПРИЯТИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

УДК 53—07/08

Б. А. БЕЛОГОРОДСКИЙ, М. М. БУТУСОВ, Ю. Г. ТУРКЕВИЧ
 (Ленинград)

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Методы голографической интерферометрии получили большое распространение при исследовании вибрации (см., например, [1—3]) по двум основным причинам: 1) данные эксперимента получаются в виде двумерной карты распределения амплитуд, что существенно сокращает время эксперимента; 2) амплитуда колебаний любой точки объекта может быть определена с весьма высокой точностью (до десятых долей микрона) для объектов произвольной формы и с любой степенью обработки поверхности. Ниже приводится сравнительный анализ областей применения и трудностей осуществления трех методов исследования вибраций — многоэкспозиционной голографии, импульсной голографии и голографирования в реальном масштабе времени, применявшихся нами при исследовании высокочастотных вибраций ($f > 10$ кГц).

Многоэкспозиционная голография. Идея многоэкспозиционного голографирования вибрирующих объектов, высказанная Пауэллом и Стетсоном [1], базируется на работах Остерберга [4], исследовавшего поведение полос в интерферометре Майкельсона с одним колеблющимся зеркалом. Как показал Остерберг, интерференционные полосы, имеющие природу полос равной толщины, описываются в этом случае выражением

$$I = I_0 \left[1 + J_0 \left(\frac{4\pi a}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi x}{h} \right], \quad (1)$$

где I — интенсивность света в зоне интерференции; I_0 — интенсивность света, падающего на интерферометр; J_0 — функция Бесселя нулевого порядка; a — амплитуда колебаний; λ — длина волны света; h — пространственный период полос; x — координата.

Функция $J_0(\alpha a)$ показана на рис. 1, причем $\alpha = 4\pi/\lambda$ для интерферометра, примененного в [4]. Видно, что при амплитудах колебания зеркала, соответствующих нулям функции Бесселя $J_0(\alpha a)$, полосы пропадают.

Методом Остерберга можно широко пользоваться в качестве вспомогательного для грубого определения амплитуд колебания различных точек исследуемых вибрато-

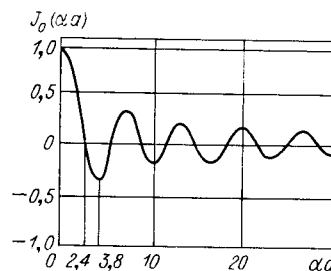


Рис. 1. Вид функции $J_0(\alpha a)$.

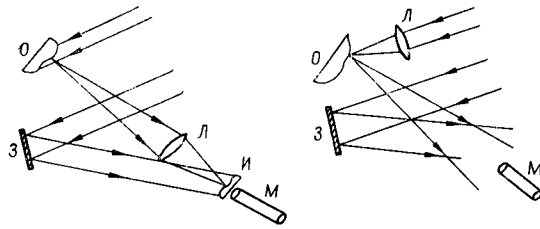


Рис. 2. Возможные схемы для приблизительного определения амплитуды вибраций:
 О — исследуемый объект; З — зеркало; И — изображение объекта; М — микроскоп; Л — линза.

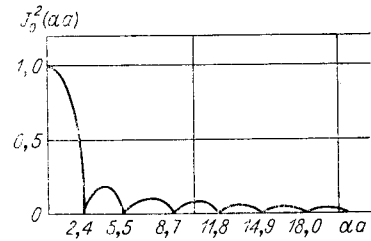


Рис. 3. Вид функции $J_0^2(\alpha a)$.

ров. Нами исследовались пьезокерамические электромеханические преобразователи на частотах около 40 кГц. При этом применялись схемы с когерентным освещением (рис. 2), с помощью которых всегда можно было определить величины питающего напряжения U , необходимые для первого исчезновения наблюдаемых в микроскопе М интерференционных полос, и установить приблизительную связь между U и амплитудой колебаний объекта a .

Применение идей Остерберга к голографии показало [1], что если проводить голографическую запись изображения вибрирующего объекта за время, много большее периода вибраций, то восстановленное с голограммы изображение объекта будет исчерчено интерференционными полосами, яркость которых зависит от амплитуды колебаний a точек поверхности вибрирующего объекта, согласно выражению

$$I = I_{\text{ст}} J_0^2(\alpha a), \quad (2)$$

где $I_{\text{ст}}$ и I — интенсивность восстановленного изображения стационарного и колеблющегося объектов соответственно; $\alpha = \frac{2\pi(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{\lambda}$, поскольку в голографической схеме косинусы углов освещения $\cos \theta_1$ и наблюдения $\cos \theta_2$ не равны единице в отличие от косинусов аналогичных углов в интерферометре [4].

На рис. 3 показан вид функции $J_0^2(\alpha a)$, из которого следует, что полосы на изображении вибрирующего объекта (т. е. линии равных амплитуд колебаний) будут видны тем хуже, чем больше амплитуда колебаний точек данного участка изображения. Этот вывод иллюстрируется рис. 4, где показано изображение мембраны, колеблющейся на частоте $f=40$ кГц.

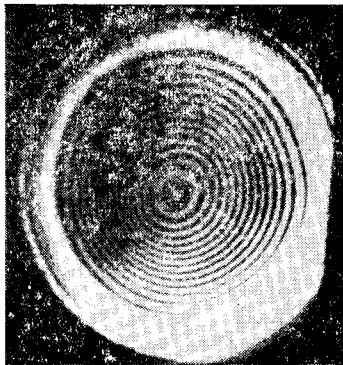


Рис. 4. Изображение колеблющейся мембраны, полученное по методу [1].

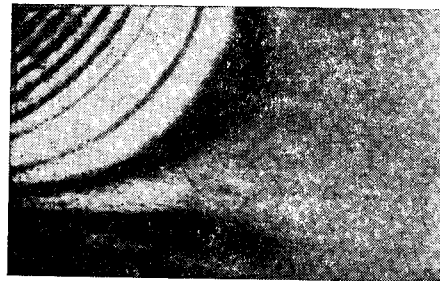


Рис. 5. Изображение колеблющегося преобразователя, полученное по методу [1].

На рис. 5 показан электромеханический преобразователь, работающий на частоте $f=40$ кГц; видны линии равных амплитуд колебаний и в виде наиболее ярких полос — участки с нулевой амплитудой. Таким образом ясно из физических соображений, то для объектов более сложного типа это достоинство многоэкспозиционных голограмм подчас оказывается решающим. Поэтому на основании данных рис. 5 можно сделать выводы о распределении амплитуд колебаний по поверхности преобразователя и, в частности, утверждать, что относительно узловых линий, легко определяемой по ее наибольшей яркости относительно других светлых линий, левый верхний угол преобразователя имеет амплитуду колебаний, соответствующую седьмому нулю функции $J_0^2(\alpha a)$. Для использования нами схемы $\cos \theta_1 = \cos \theta_2 \approx 0,8$; $a \approx 1,32$ мкм. Другим несомненным удобством метода является простота голографической схемы (используется обычная схема с боковым опорным пучком).

Если колебания объекта достигают сравнительно больших величин, соответствующих десяти и более максимумам функции $J_0^2(\alpha a)$, то «видность» интерференционных полос на изображении, да и само изображение будут весьма плохими. Увеличивая углы освещения и наблюдения, можно при тех же колебательных режимах получить меньшее количество полос соответственно лучшей видности. На рис. 6 показана мембрана в том же режиме, что и на рис. 4, но освещенная и снятая под углами $\theta_1 = \theta_2 = 66^\circ$ ($\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ для рис. 4).

Возможности метода многократной экспозиции могут быть существенно расширены при использовании фазовой модуляции опорного луча [5, 6]. Фазовая модуляция опорного луча предполагает введение в тракт опорного луча вибрирующего зеркала, колеблющегося с амплитудой a_0 и фазой Φ (отсчет фазы ведется относительно колебаний исследуемого объекта). Интенсивность восстановленного изображения, полученного в такой схеме, описывается формулой [6]

$$I = I_{\text{ст}} J_0^2 \left(\alpha \sqrt{a^2 + a_0^2 - 2aa_0 \cos \Phi} \right). \quad (3)$$

Из формулы (3) хорошо видны возможности метода фазовой модуляции опорного луча. Во-первых, если вибрирующий объект совершает возвратно-поступательные колебания с большой (порядка 10λ и более) амплитудой a , то в соответствии с (2) изображение объекта, восстановленного с обычной голограммы, будет очень темным. Вводя разность фаз $\Phi = 0$, можно подбором амплитуды колебаний опорного вибратора «скомпенсировать» влияние возвратно-поступательных колебаний объекта и наблюдать на изображении объекта распределения амплитуд Δa по поверхности.

Во-вторых, если объект совершает колебания настолько малой амплитуды (порядка $0,05$ мкм), что соответствующий аргумент αa значительно меньше первого нуля функции J_0^2 , то при восстановлении изображения распределение амплитуд колебаний по поверхности будет неразличимо на светлом

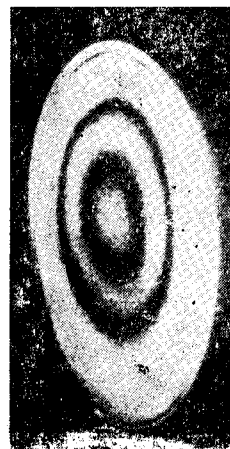


Рис. 6. Изображение мембраны, полученное под большими углами освещения и наблюдения.

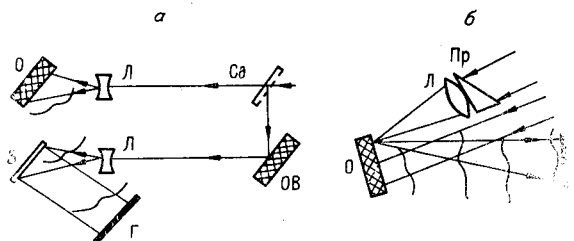


Рис. 7. Схемы фазовой модуляции опорного пучка: ОВ — опорный вибратор; Сд — светоделитель; Г — голограмма; Пр — призма для установки фокального пятна опорной волны на выбранном участке объекта.

луча осуществляется зеркалом, закрепленным на вибраторе, который возбуждается сигналом той же частоты, что и объект (рис. 7, а), а синфазная модуляция также может осуществляться полированным малым участком поверхности самого объекта (рис. 7, б). В случае, соответствующем рис. 7, а, подбор необходимой фазы колебаний опорного вибратора (ОВ) приходится вести эмпирически, поскольку фазы колебаний могут отличаться от фаз электрических сигналов. Практически это означает, что при постоянной амплитуде a_0 надо сделать несколько голограмм для нескольких значений разности фаз Φ . Та из голограмм, на которой число полос будет минимальным, а видность изображения наилучшая, соответствует синфазным колебаниям опорного вибратора и объекта, и наоборот. После установления фазы можно переходить к установлению амплитуды a_0 , пользуясь методами, описанными на рис. 1, т. е. наблюдая качество интерференционной картины, создаваемой полями объекта и опорного зеркала.

На рис. 8 приведено распределение амплитуд колебаний по части поверхности объекта, совершавшего почти поршневые колебания с амплитудой $a > 10\lambda$. При получении голограмм такого объекта на обычной голографической схеме [1] изображение практически отсутствовало из-за большой величины аргумента aa в формуле (2). Изображение рис. 8 получено по схеме рис. 7, б.

На рис. 9 приведено изображение поверхности объекта, совершавшего малые колебания, полученное по схеме рис. 7, а с противофазным смещением опорного вибратора. На обычной схеме получалось светлое изображение без видимого распределения яркостей.



Рис. 8. Изображение участка преобразователя, полученное на схеме рис. 7, б.

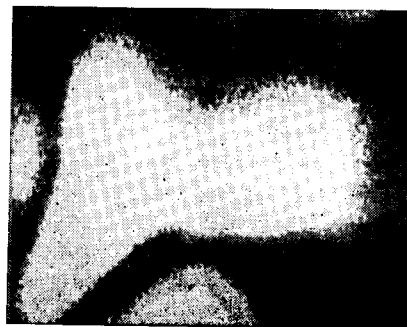


Рис. 9. Распределение амплитуд колебаний по поверхности преобразователя в режиме малых амплитуд, полученное по схеме рис. 7, а.

Импульсная голография. Очевидно, что, создавая короткие импульсы света и высвечивая объект лишь в те моменты, когда он находится в крайних положениях, можно, как это делается в методе двух экспозиций [7], получить интерференционную картину полос, обладающую важными преимуществами перед подобной картиной, полученной по методу Стетсона и Пауэлла: во-первых, видность полос постоянна и не зависит от номера полосы; во-вторых, расстояния между темными полосами соответствуют постоянным разностям амплитуд колебаний ($\Delta a = \lambda/2$ для $\theta_1 = \theta_2 \approx 0$) в то время, как нули функции $J_0^2(\alpha a)$ расположены нерегулярно по оси aa (см. рис. 3). Применительно к низкочастотным вибрациям стробоскопическое освещение колеблющегося объекта осуществлялось механическими прерывателями [8, 9]. В интересующем нас диапазоне частот это невозможно, и наиболее рациональный путь состоял в использовании импульсного лазера. Нами был использован рубиновый лазер с пассивной модуляцией добротности, селекцией поперечных мод и длиной когерентности $l_k \approx 30$ см. С точки зрения получения голограмм этот лазер удовлетворял всем необходимым требованиям, так как световая энергия излучения составляла около 1 мДж при длительности импульса $\tau \approx 10^{-7}$ с. Малая длительность импульса позволяла получать голограмму в произвольный момент времени, определявшийся впоследствии по осциллограмме с осциллографа (рис. 10), верхний луч которого фиксировал момент генерации лазера, а нижний — электрический сигнал, подаваемый на вибратор. Вторая экспозиция делалась при неподвижном вибраторе. Получив несколько (обычно около 10) голограмм, можно было составить полное представление о характере поведения поверхности вибратора в разные моменты его колебаний, а также определить фазу между механическими колебаниями вибратора и электрическим сигналом, подаваемым на него.

Использование лазера с пассивным затвором дает также весьма ценную возможность работать в двухимпульсном режиме и избавиться от необходимости производить вторую экспозицию с неподвижного объекта. На рис. 11 показана соответствующая осциллограмма, а на рис. 12 — изображение вибратора, восстановленное с голограммы.

Голография в реальном масштабе времени. Использование схем голографирования в реальном масштабе времени с применением непрерывных лазеров [2, 10] оказывается весьма выгодным, когда нужно получить информацию о характере колебаний объекта при плавном изменении амплитуды или частоты питающего напряжения. Основные трудности здесь возникают при обработке голограммы, поскольку требуются либо точная (до $0,1\lambda$) установка обработанной голограммы на место

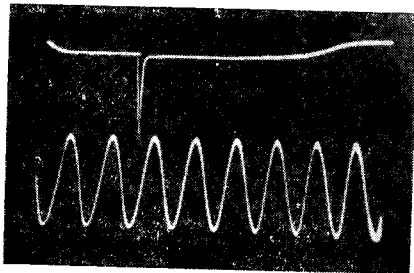


Рис. 10. Осциллограмма импульса генерации лазера (верхний луч) и питающего напряжения преобразователя (нижний луч).

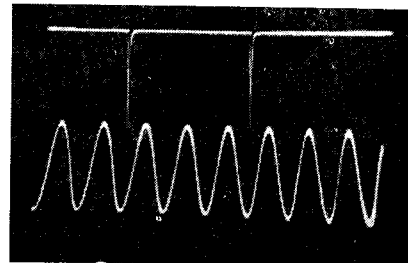


Рис. 11. То же, что и на рис. 10, но для двухимпульсного режима.



Рис. 12. Изображение преобразователя, полученное методом импульсной голографии.

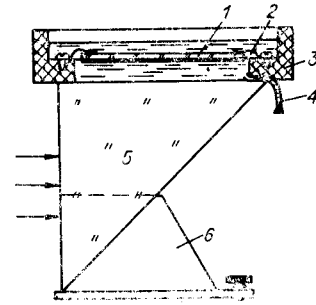


Рис. 13. Блок крепления голограммы для наблюдения вибраций в реальном времени.

экспонирования, либо обработка голограммы прямо в схеме. Второй путь более удобен; однако в любом случае на изображении объекта после высыхания голограммы видны полосы, вызванные усадкой эмульсии. Нами использовался специальный блок крепления голограммы на основе призмы полного внутреннего отражения (рис. 13), применяя который можно было работать с отечественными фотопластинками «Микрат-ВР» (изображение без паразитных полос сохранялось в течение нескольких суток). Перед проведением голографирования фотопластинку заливали дистиллированной водой и, спустя 6—8 минут, не сливая воды, проводили экспонирование. Смена растворов осуществлялась открытием выпускной трубки. Отбеленные голограммы, полученные в таком блоке, обладали такой яркостью восстановленного изображения, что интерференционные полосы, возникающие при одновременном наблюдении записанного на голограмму неподвижного вибратора и наблюдаемого сквозь голограмму движущегося вибратора, достигали максимальной контрастности без применения каких-либо выравнивающих фильтров.

Однако по своей сути метод голографирования в реальном масштабе времени не может дать такой контрастности полос, как другие вышеречисленные методы, так как видность полос определяется выражением

$$I = I_{ст} [1 + \cos \varphi J_0(\alpha\omega)], \quad (4)$$

где φ — сдвиг фазы, вносимый компенсирующими светофильтрами. Контрастность интерференционных полос при больших амплитудах хуже, чем даже в методе [1]. Для исправления этого недостатка можно ввести либо стробоскопическую подсветку объекта [9], либо фотографировать объект со временем экспозиции много меньше периода колебаний. Применительно к высокочастотным вибраторам первый путь не годится по соображениям, указанным выше, а второй требует сверхчувствительных фотоматериалов. Поэтому в данное время метод реального времени не может, очевидно, заменить все другие методы при исследовании высокочастотных вибраций, несмотря на его очевидные достоинства.

ВЫВОДЫ

Применительно к исследованию высокочастотных ($f > 10$ кГц) вибраций перечисленные методы обладают следующими сравнительными достоинствами:

б) импульсная голография (метод двух экспозиций): видность интерференционных полос не зависит от номера полосы, что до некоторой степени снимает ограничения на предельные амплитуды колебаний, пригодные для исследования;

в) голография в реальном масштабе времени: визуальное наблюдение интерференционных полос позволяет проводить экспрессный анализ поведения вибратора в широком диапазоне амплитуды и частоты возбуждающего напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. L. Powell, K. A. Stetson. Interferometric Analysis of Vibrations by wave-front reconstruction.— Journ. Opt. Soc. Am., 1965, 55, № 12.
2. Ю. И. Островский. Голография. Л., «Наука», 1970.
3. Бюллетень иностранной научно-технической информации ТАСС, 1968, № 33.
4. H. Osterberg. An interferometer Method of Studying Vibrations of an Oscillating Quartz Plate.— Journ. Opt. Soc. Am. 1932, 22, № 1.
5. C. C. Aleksoff. Time Average Holography Extended.— Appl. Phys. Lett., 1969, 14, № 1.
6. Б. А. Белогородский, М. М. Бутусов, Ю. Г. Туркевич. Голографический метод исследования вибраций с модулированным по фазе опорным пучком.— Акустический журнал, 1971, XVII, № 3.
7. L. O. Heflinger, R. E. Brooks, R. Wuerker. Holographic interferometry.— Journ. Appl. Phys., 1966, 37, № 2.
8. P. Shajenko, C. D. Johnson. Stroboscopic Holographic Interferometry.— Appl. Phys. Lett., 1968, 13, № 1.
9. А. Н. Зайдель, Л. Г. Малхасон, Г. В. Маркова, Ю. И. Островский. Стробо-голографический метод изучения вибраций.— ЖТФ, 1968, XXXVIII, № 10.
10. A. E. Ennos, E. Archbold. Application Note: Vibrating Surface Viewed in Real Time by Interference Holography.— Laser Focus, 1968, 4, № 19.

*Поступила в редакцию
14 декабря 1970 г.,
окончательный вариант —
14 июня 1971 г.*