АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVI 1980 Вып. 5

УДК 621.373.826:534.6

# ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*П. Е. Васильев, Э. И. Ясюленис*

Рассматривается целесообразность применения лазерной интерферометрии для исследования ультразвуковых колебательных систем (УКС). Приводятся схемы и краткое описание лазерных интерферометров Майкельсона с одним и двумя зондирующими лучами, а также некоторые результаты экспериментального исследования составных стержневых УКС.

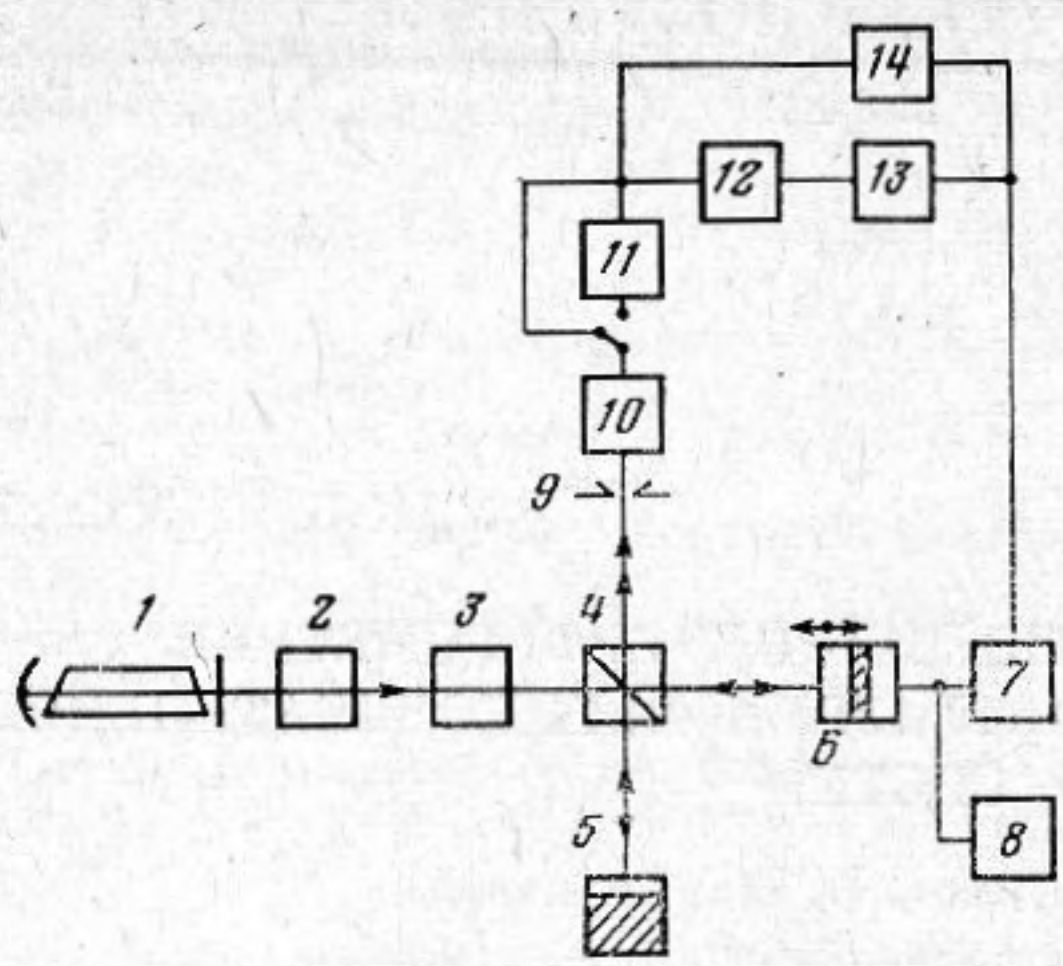
В настоящее время в акустике применяются контактные и бесконтактные методы измерения параметров механических колебаний [1]. Воздействие на исследуемый объект ограничивает область практического использования контактных методов и в основном обусловливает их непригодность для исследования маломощных высокодобротных колебательных систем. Свободны от этого недостатка бесконтактные измерители относительной вибрации, основанные на применении индуктивных, емкостных, фото- и других датчиков. Однако в ряде случаев они не обеспечивают требуемой чувствительности, пространственного и временнóго разрешения и нуждаются в дополнительной калибровке. К тому же применение таких измерителей крайне затруднительно для исследования вибраций сложных траекторий, наблюдаемых, например, в связанных акустических контурах с разным типом колебаний.

Для экспериментального исследования ультразвуковых колебательных систем (УКС) более перспективен интерференционный оптический метод, предложенный в работе [2] и развитый многими другими авторами.

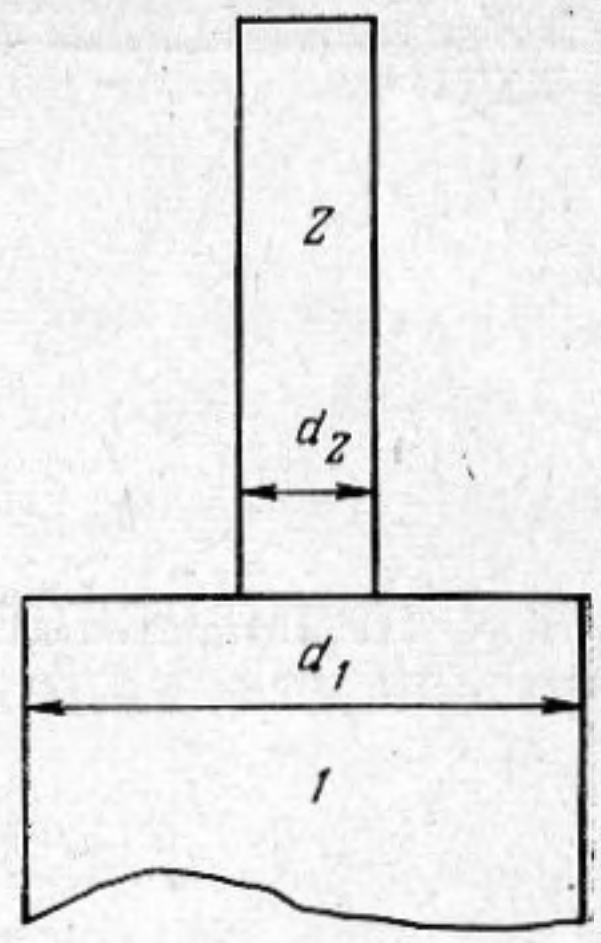
Использование газовых лазеров в качестве источников монохроматического высококогерентного излучения позволило значительно расширить функциональные возможности оптических интерферометров. Так, в работе [3] показана возможность регистрации механических колебаний порядка $10^{-3}$ Å с сохранением условия некритичности измерителя к состоянию поверхности исследуемого образца. В работе [4] на диффузно рассеивающей поверхности исследовались амплитуды, в сотни раз превышающие длину волны лазерного излучения.

К недостаткам лазерных интерференционных систем следует отнести высокую чувствительность ко всякого рода нестабильностям (вибрационным, тепловым и т. п.). Устраняются они путем повышения виброустойчивости основания измерительной установки, а также введением обратной связи в опорное плечо интерферометра.

Для исследования пакетных преобразователей колебаний и построенных на их основе ультразвуковых колебательных систем (например, [5]) нами применена лазерная интерферометрическая установка, схема которой показана на фиг. 1. В основу схемы положен интерферометр Майкельсона с фотоэлектрической регистрацией интерференционного сигнала. Луч лазера ЛГ-52-3 *1* (мощность излучения 2 мВт, длина волны излучения




Фиг. 1. Схема экспериментальной установки




Фиг. 2. Ступенчатая ультразвуковая колебательная система

0,63 мкм), работающего в одномодовом режиме, пройдя оптический вентиль *2* и фокусирующую систему *3*, расщепляется в светоделителе *4* на два равных по интенсивности пучка — опорный и измерительный. Опорный луч, отразившись от неподвижного зеркала *5*, через тот же светоделитель и ограничивающую диафрагму *9* с круглым отверстием попадает на вход фотоумножителя ФЭУ-51 *10*, питаемого от стабилизированного источника питания ВС-22. Туда же направляется и отраженный исследуемым объектом *6* сигнальный луч. В плоскости диафрагмы оба луча образуют интерференционную картину, параметры которой зависят от степени расстройки интерферометра, параметров фокусирующей системы, разности интенсивностей и оптических путей сигнального и опорного световых пучков.

Качество работы интерферометра, особенно при измерении амплитуд, не превышающих 0,1 мкм, во многом определяется стабильностью интенсивностей сигнального и опорного лучей. С целью предотвращения отрицательного влияния на стабильность интенсивности лазерного излучения отражений от оптических элементов интерферометра на пути луча позади лазера помещен оптический вентиль, состоящий из поляроида и четвертьволновой пластинки.

При исследовании колебаний на диффузно рассеивающих поверхностях интенсивность опорного луча значительно выше интенсивности измерительного, что уменьшает контрастность интерференционной карты в плоскости диафрагмы, а тем самым и величину переменной составляющей фототока на выходе ФЭУ, несущей информацию о движении объекта. С целью выравнивания интенсивностей лучей в опорное плечо интерферометра помещались нейтрально-серые светофильтры с разными коэффициентами поглощения.

Равенство длин плеч и высокое пространственное разрешение интерферометра обеспечивалось помещением исследуемого объекта и опорного зеркала в фокальной плоскости фокусирующей системы. Пространственное разрешение в нашем случае было 80 мкм. Диаметр диафрагмы был равен половине ширины интерференционной полосы. Данное соотношение является оптимальным в случае, когда ширина полос меньше апертуры пятна.

Оптические элементы схемы крепились к двухкоординатным держателям призм. Это обеспечило простую и надежную юстировку измерительной установки. С целью уменьшения влияния внешних дестабилизирую-

щих факторов на работу интерферометра оптическая часть схемы, в том числе лазер и ФЭУ, была собрана на массивной плите (разметочном столе). Полное подавление низкочастотных шумов на выходе ФЭУ, обусловленных паразитными вибрациями, достигалось путем включения активного фильтра *11* с полосой задержки до 25 кГц.

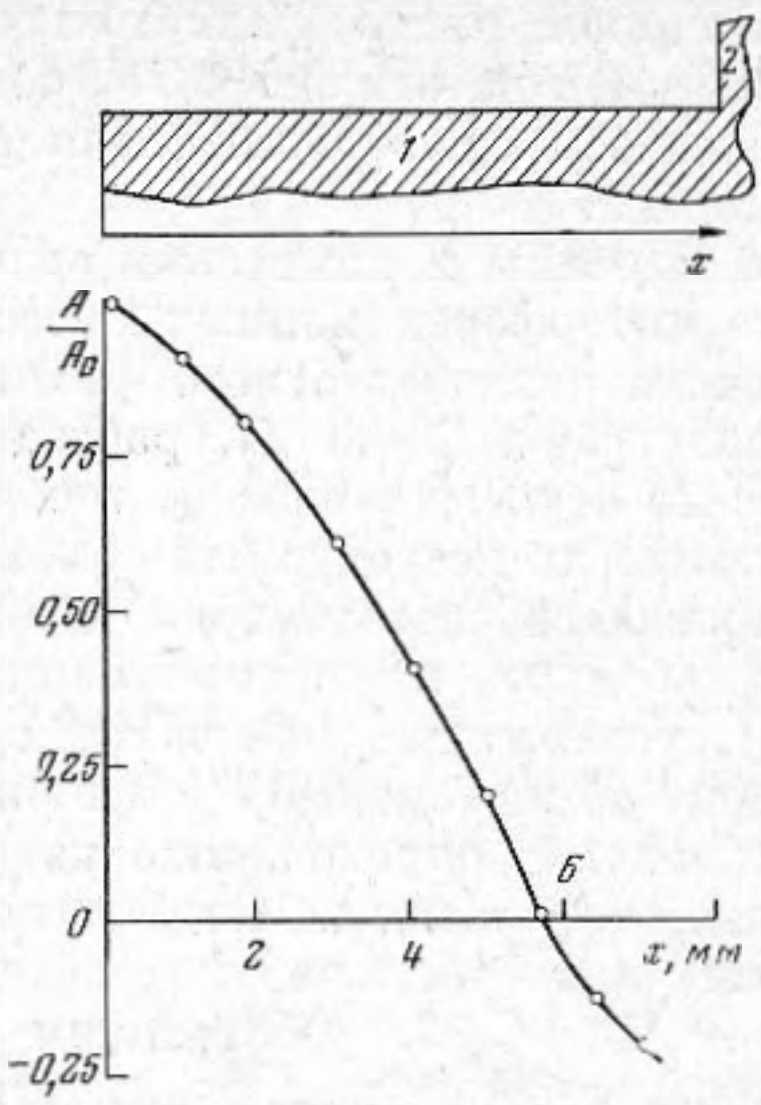
Для регистрации интерференционной картины и измерения амплитуд колебаний нами применялся метод счета интерференционных полос. Для этого сигнал с выхода фотоприемника после низкочастотного фильтра *11* поступал на вход запоминающего осциллографа С8-13 *14*, работающего в ждущем режиме. Запуск осциллографа *14* осуществлялся от генератора ГЗ-33, от которого также подавалось питание на исследуемый объект. Частота питающего напряжения контролировалась частотомером ЧЗ-35А *8*.

Амплитуды колебаний исследуемого объекта, не превышающие $\lambda/8$ ($\lambda$ — длина волны лазерного излучения), устанавливались путем сравнения амплитуды первой гармоники фототока на выходе ФЭУ с амплитудой низкочастотных шумов. Амплитуды больше $\lambda/8$ определялись из осциллограмм преобразованного интерференционного сигнала. Когда амплитуда колебаний исследуемого объекта превышала 1 мкм, счет интерференционных полос осуществлялся частотомером ЧЗ-34 *13*, работающим в режиме деления частот. Для этого преобразованный сигнал, предварительно усиленный усилителем-ограничителем *12*, поступал на вход А частотомера *13*. На вход Б этого же частотомера подавалось напряжение от генератора *7*, питающего исследуемый объект. Амплитуда колебаний в данном случае находится из соотношения $A=n\lambda/8$, где $n$ — показания частотомера, означающие число интерференционных периодов, пересекающих отверстие диафрагмы за время $T$ ($T$ — период колебаний исследуемого объекта).

Таким образом, при помощи описанной выше установки исследовались амплитуды колебаний от 0,01 до 10 мкм на частоте 70 кГц. Следует заметить, что верхний предел исследуемых амплитуд ограничивается частотными характеристиками применяемых стандартных приборов (ФЭУ, осциллографа, частотомера).

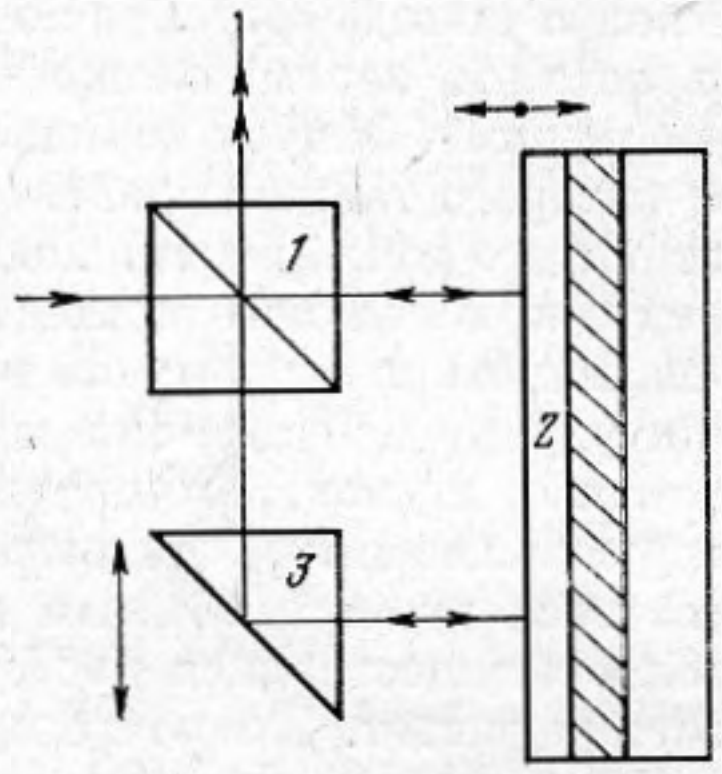
Лазерная интерферометрия особенно полезна при исследовании ступенчатых составных ультразвуковых колебательных систем. На фиг. 2 показана ступенчатая ультразвуковая колебательная система, состоящая из несимметричного пакетного преобразователя *1*, к середине переднего торца которого прикреплен четвертьволновой стержень *2* меньшей площади поперечного сечения. Перепад площадей равен 18 ($d_1/d_2=4{,}24$). В стержневом приближении теоретический расчет подобных систем основан на решении одномерного волнового уравнения с заданными граничными условиями. Возможность искажения фронта волны деформации, распространяющейся по системе, при этом не учитывается.

Установленное при помощи описанной методики распределение амплитуд продольных колебаний на нагруженном торце преобразователя показано на фиг. 3. Как следует из кривой распределения, нагружение преобразователя стержнем меньшего поперечного сечения вызывает искажение фронта волны деформаций: максимальные амплитуды наблюдаются на краях пакета, а вблизи места стыка образуется узловая зона. Для определения фаз колебаний по обеим сторонам узловой зоны классический интерферометр Майкельсона был модифицирован нами в дифференциальный. Особенностью дифференциальной схемы является то, что в данном случае оба луча используются как измерительные. Направление лучей в дифференциальной схеме показано на фиг. 4. Луч лазера расщепляется в светоделителе *1* на два пучка. Один из них направляется непосредственно на определенную точку исследуемого объекта *2*. Другой луч при помощи призмы полного внутреннего отражения *3* направляется на другую точку того же объекта. В этом случае ток на выходе ФЭУ несет информацию об относительном движении исследуемых точек. Зная абсолютные




Фиг. 3

Фиг. 3. Распределение амплитуд продольных колебаний на нагруженном торце преобразователя: $A_0=0{,}5$ мкм




Фиг. 4

Фиг. 4. Направление лучей в дифференциальной схеме интерферометра

амплитуды колебаний в данных точках, мы можем судить об их относительной фазе.

Таким образом показано, что точки, находящиеся по обеим сторонам узловой зоны, колеблются в противофазе (фиг. 3). Установленное с помощью лазерной интерферометрии наличие деформации волнового фронта в подобных системах указывает на необходимость совершенствования их теоретического расчета. Решение одномерного волнового уравнения не дает полного представления о явлениях, происходящих в ступенчатых ультразвуковых колебательных системах со значительным перепадом площадей поперечных сечений отдельных ее звеньев.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара. Справочник. Под ред. В. В. Клюева. М., «Машиностроение», 1978.
2. *Берштейн И. Л.* Об измерении весьма малых изменений разности хода двух световых колебаний. Докл. АН СССР, 1952, *94*, 4, 655–658.
3. *Захаров В. П., Евтихиев Н. Н., Снежко Ю. А., Тычинский В. П.* Применение лазерной интерферометрии для изучения колебательных явлений. Акуст. ж., 1976, *22*, 1, 32–36.
4. *Мейрон Е.* Измерение вибраций большой амплитуды методом оптической интерферометрии. Приборы для научных исследований, 1970, 8, 120–121.
5. *Васильев П. Е.* Вибродвигатели и вибрационные лентопротяжные механизмы. Электротехническая промышленность. Сер. Бытовая электротехника, 1978, 2(45), 6–10.

Поступила
24 декабря 1979 г.