

УДК 535.241

А. И. Кондратьев, Ю. М. Криницын, С. А. Гусаков

(Хабаровск)

**ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Предложены и исследованы два метода стабилизации чувствительности лазерных интерферометров. Результаты эксперимента хорошо согласуются с численными расчетами, что позволяет использовать эти методы в измерительной технике.

Необходимость проведения высокоточных абсолютных измерений колебаний поверхности оставляет актуальной проблему совершенствования оптических, и в частности лазерных, методов измерения. Известно, что порог чувствительности и погрешность интерференционных лазерных устройств определяются нестабильностью частоты и мощности лазерного излучения, шумом регистрирующей аппаратуры и вредными акустическими вибрациями.

В работе [1] описаны методы и средства снижения отрицательного влияния мешающих факторов на результаты измерений. Наиболее эффективными и простыми в реализации оказались следующие методы: а) выравнивание плеч интерферометра для снижения частотных шумов лазера; б) компенсационный прием для уменьшения влияния кратковременных (характерный период менее 1 мин) флуктуаций мощности лазерного излучения; в) отрицательная обратная связь для стабилизации базы интерферометра.

В комплексе эти методы позволяют снизить порог чувствительности до $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ м/Гц^{1/2} (теоретический порог чувствительности, определяемый дробовыми шумами фотоприемника, составляет $1,6 \cdot 10^{-14}$ м/Гц^{1/2}) и уменьшить погрешности измерений до единиц процентов. Дальнейшее улучшение метрологических характеристик сдерживается влиянием долговременной нестабильности мощности излучения современных лазеров, достигающей 10 % и более. Методы стабилизации мощности лазерного излучения сложны, кроме того, они приводят к снижению интенсивности светового потока и как следствие к уменьшению чувствительности [2]. В диапазоне частот выше 20 кГц нестабильность, с одной стороны, приводит к нестабильности чувствительности интерферометра, а с другой (при включенной системе стабилизации базы) – к «уходу» интерферометра с рабочей точки и возникновению систематических погрешностей при измерении смещений поверхности [1].

Рассмотрим два способа измерения колебаний поверхности, позволяющие обойти описанные трудности. Оба способа основаны на постоянном контроле фактических изменений интенсивности излучения и позволяют проводить прецизионные измерения при использовании стандартных лазеров типа ЛГ-122 или ЛГ-79 [3, 4].

При реализации первого способа в качестве опорного сигнала используется уровень интенсивности оптического излучения источника (рис. 1, *a*). Интерферометр содержит лазер 1 в качестве источника излучения, светоделитель 3, отражающие зеркала измерительного плеча 2 и опорного плеча 4. Часть излучения лазера 1 посредством светоделительной пластины 5 отводится на фотоприемник 6, который вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный интенсивности излучения лазера, подаваемый далее на один из входов дифференциального усилителя 10. При этом сигнал с дополнительного фотоприемника 6 не зависит от оптической фазы интерферометра. На второй вход усилителя 10 подается сигнал с фотоприемника 9, величина которого пропорциональна интенсивности интерферирующих лучей в отраженном свете. При этом изменение оптической фазы интерферометра (относительные перемещения поверхности образца 2 и опорного зеркала 4) вследствие действия акустических шумов приводит к изменению сигнала фотоприемника 9 на величину, пропорциональную расстройке оптической фазы интерферометра, что приводит к появлению сигнала, поступающего на

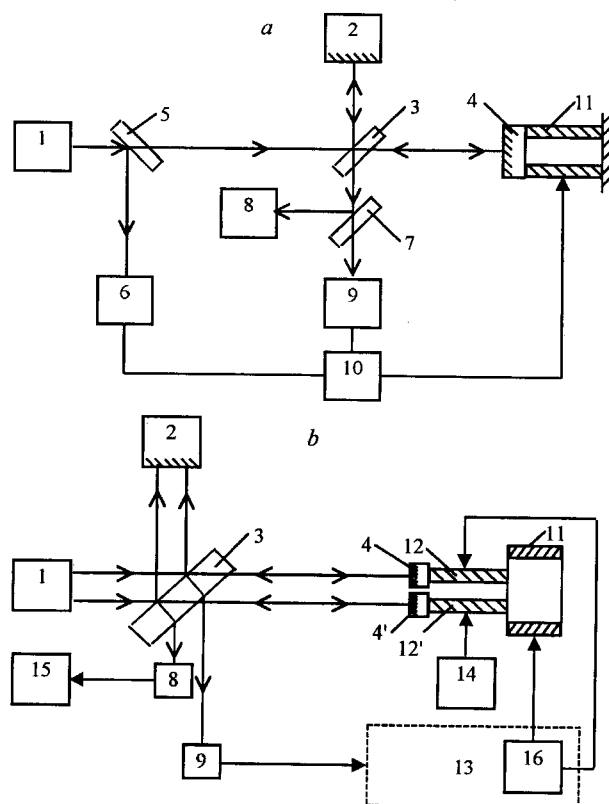


Рис. 1. Блок-схема лазерных измерителей колебаний: *a* – первый способ; *b* – второй способ

исполнительный элемент 11 (пьезопривод) и компенсирующего акустические шумы. Часть интерферирующего излучения отводится светоделительной пластиной 7 на фотоприемник 8, сигнал которого фиксируется блоком регистрации 15. Полезный сигнал и сигнал «акустического шума», как отмечено выше, разделены по частотам, причем цепь обратной связи (фотоприемник 9, усилитель 10, пьезопривод 11) работает в области частот ниже $f_{гр} \approx 1$ кГц. Изменение интенсивности излучения лазера 1 приводит к одновременному и синфазному изменению сигналов с фотоприемников 6 и 9. Вследствие большого подавления синфазных сигналов дифференциальным усилителем 10 сигнал на исполнительном элементе 11 не изменяется. При этом изменение интенсивности излучения лазера 1 не приводит к изменению оптической фазы интерферометра.

По второму способу в процессе измерений производится периодический контроль размаха интерференционной картины и подстройка рабочей точки интерферометра (рис. 1, *b*). В этом варианте для повышения точности измерения используется принцип модуляции интерференционной картины.

Установка работает следующим образом. Расширенный до необходимого диаметра луч лазера 1 направляется на светоделитель 3, где расщепляется на два луча, один из которых отражается от объекта 2, а другой — от зеркала 4 и 4'. Луч, отраженный от зеркала 4', и луч, отраженный от поверхности объекта 2, образуют первую интерференционную картину, которая проецируется на фотоприемник 8. Другой луч, отраженный от зеркала 4 и поверхности объекта 2, образует вторую интерференционную картину, которая проецируется на фотоприемник 9, подключенный к системе отрицательной обратной связи 13, выполненной в виде экстремального регулятора. При подаче на пьезопривод 11 синусоидального напряжения от генератора 16 частотой ω_0 происходит модуляция интенсивности второй интерференционной картины и на выходе фотоприемника 9 вырабатывается синусоидальный электрический сигнал, частота и фаза которого зависят от фазы интерференционной картины. Если фаза интерференционной картины равна $2m\pi$, то частота электрического сигнала фотоприемника 9 равна $2\omega_0$. Если фаза интерференционной картины не равна $2m\pi$, то в сигнале присутствует составляющая с частотой ω_0 . Фаза этой составляющей относительно фазы опорной частоты генератора 16 определяется знаком отклонения фазы интерференционной картины от точки $\varphi_0 = 2m\pi$. Система отрицательной обратной связи 13 выделяет из сигнала фотоприемника 9 сигнал с частотой ω_0 , сравнивает фазу этого сигнала с фазой опорного сигнала и вырабатывает управляющий сигнал, который поступает на пьезопривод 11 для подстройки фазы в точке $\varphi_0 = 2m\pi$. Информативным каналом в обоих устройствах является цепь — фотоприемник 8, блок регистрации 15. Таким образом происходит жесткая стабилизация фазы второй интерференционной картины независимо от мощности I лазерного излучения на входе в интерферометр. Фаза первой интерференционной картины жестко связана с фазой второй картины, но может плавно регулироваться относительно нее регулируемым напряжением источника 14. Перед проведением измерений смещений поверхности образца 2 посредством пьезопривода 12 проводится определение размаха интерференционной картины и затем с помощью пьезопривода 12' и источника 14 настройка измерительного канала на рабочую точку.

Экспериментальные исследования параметров интерферометров проводились на установке, показанной на рис. 2. Излучение He-Ne-лазера 1 через электрооптический модулятор 2 поступает в интерферометр 3, одним из зер-

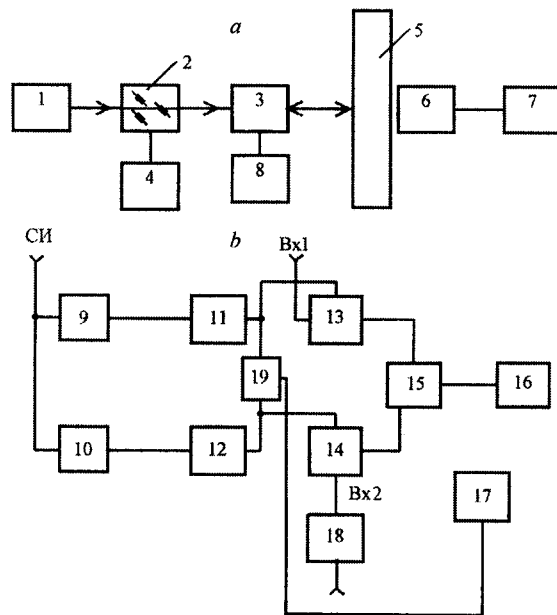


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

кал которого является поверхность образца 5. Ультразвуковые колебания в образце 5 возбуждаются емкостным преобразователем или пьезопреобразователем 6, электрически связанным с генератором 7. На модулятор 2 с блока питания 4 подается пилообразное напряжение амплитудой до 400 В. В качестве генератора 7 используется либо генератор прямоугольных импульсов, собранный на длинных линиях, либо генератор радиоимпульсов. Блок возбуждения (преобразователь 6, генератор 7) позволяет генерировать УЗ-импульсы в диапазоне частот 0,1–20 МГц (диапазон длительностей 100 нс – 10 мкс) амплитудой до $5 \cdot 10^{-8}$ м [1]. Сигнал с интерферометра 3 поступает в блок регистрации 8. Структурная схема блока регистрации 8 приведена на рис. 2, *b*.

Работа блока регистрации основана на запоминании мгновенных значений амплитуды ультразвукового импульса и опорного сигнала с последующим вычислением по методу двойного интегрирования их отношения. Суть метода двойного интегрирования заключается в определении отношения двух напряжений ($U_{\text{изм}}/U_{\text{оп}}$) по отношению числа тактов интегрирования опорного канала к числу тактов интегрирования измерительного канала ($N_{\text{оп}}/N_{\text{изм}}$). Причем $N_{\text{оп}}$ определяется по моменту обнуления сигнала сумматора блока 8 [5]. В качестве опорного сигнала выбирается амплитуда возбуждающего электрического импульса генератора 7.

Исследуемый и опорный (через аттенуатор 18) сигналы подаются на входы 1, 2 устройств выборки-хранения (УВХ) 13, 14 соответственно. УВХ устанавливаются на своих выходах напряжения, равные мгновенным значениям входных напряжений в моменты прихода запускающих импульсов с одновибраторов 11, 12 [6]. Запуск одновибраторов задерживается относительно входного синхроимпульса (СИ), поступающего с генератора 7 (рис. 2, *a*) на регулируемые ключами 9, 10 времена τ_1 и τ_2 . Сигналы с выхода УВХ поступают на вход усилителя 15, работающего по методу двойного интегрирования. Результаты измерения отношений отображаются на цифровом индикаторе.

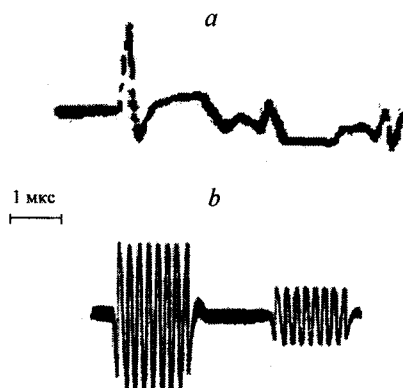


Рис. 3. Осциллограммы переотраженных ультразвуковых импульсов: *a* – режим видеоимпульса; *b* – режим радиоимпульса

торе 16. Схема совпадения 19 вырабатывает метки времени, обеспечивающие необходимые задержки выборок относительно синхроимпульсов. Наблюдение переотраженных в образце ультразвуковых импульсов и меток времени осуществляется осциллографом 17. Чувствительность схемы к относительным изменениям сигналов на входах 1 или 2 не хуже 0,01 дБ. Перед началом экспериментов аттенюатор 18 настраивался таким образом, чтобы отношение сигналов при проведении измерений по второму способу при $\Delta I_0 = 0$ и $u_0 = 1 \cdot 10^{-10}$ м составляло $1,00 \pm 0,01$ (при этом амплитуда опорного сигнала принята равной A_0). В дальнейшем эксперименты для первого способа проводились при неизменной настройке аттенюатора и тех же значениях амплитуды генератора 7 (см. рис. 2, *a*). За меру качества работы интерферометра принято отношение амплитуды преобразованного сигнала u_0 к амплитуде входного сигнала A_0 .

Характерные осциллограммы переотраженных ультразвуковых импульсов показаны на рис. 3. Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 4.

В соответствии с рис. 4, *a* (второй способ) при $u_0 < 1 \cdot 10^{-8}$ м сигнал на выходе интерферометра при измерении в пределах 1 % пропорционален u_0 . При $u_0 > 1 \cdot 10^{-8}$ м и погрешности измерений менее 1 % необходимо проводить вычисление значений смещений по формуле

$$u(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arcsin \left(\frac{\delta i(t)}{K_1 I} \right).$$

Для первого способа сигнал на выходе интерферометра пропорционален интенсивности лазерного излучения, причем при $u_0 < 1 \cdot 10^{-8}$ коэффициент пропорциональности практически не зависит от I (рис. 4, *b*). Для обеспечения погрешности измерений по первому способу менее 1–2 % необходима организация отрицательной обратной связи, компенсирующей изменение интенсивности I .

Среднеквадратическая ошибка измерений в обоих экспериментах во всем исследуемом диапазоне изменения u_0 не превышала $0,02u_0 / (N)^{1/2}$, где N – число измерений.

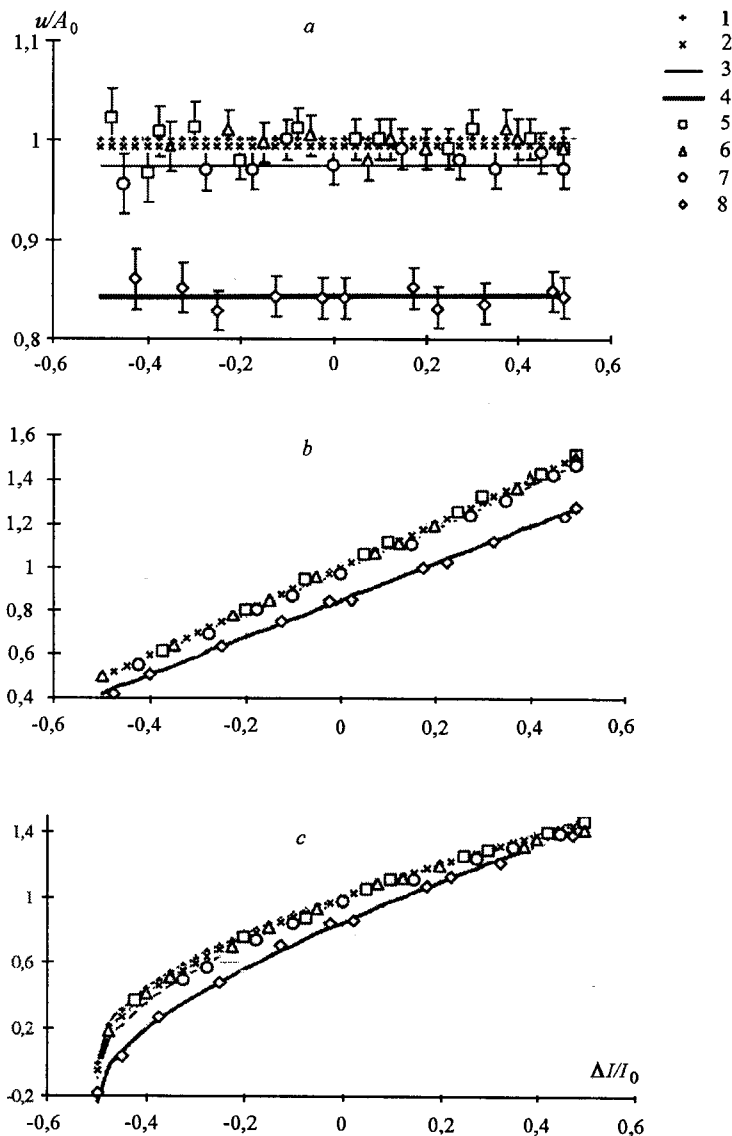


Рис. 4. Результаты измерения характеристик интерферометров: *a* – второй способ; *b* – первый способ; *c* – метод стабилизации базы; 1, 5 – зависимость выходного сигнала интерферометра от ΔI при $u = 1 \cdot 10^{-10}$ м; 2, 6 – при $u = 1 \cdot 10^{-8}$ м; 3, 7 – при $u = 2 \cdot 10^{-8}$ м; 4, 8 – при $u = 5 \cdot 10^{-8}$ м; кривые 1–4 – расчет

Для сопоставления приведенных результатов с данными, полученными традиционным методом стабилизации базы, подробно описанным в работе [1], проведены аналогичные измерения. Полученные результаты представлены на рис. 4, *c*. На рисунке видно, что в этом случае в соответствии с приведенным выражением характер зависимости сигнала на выходе интерферометра от I при всех u нелинейный. При уменьшении интенсивности ($\Delta I < 0$) может происходить изменение фазы сигнала на противоположную.

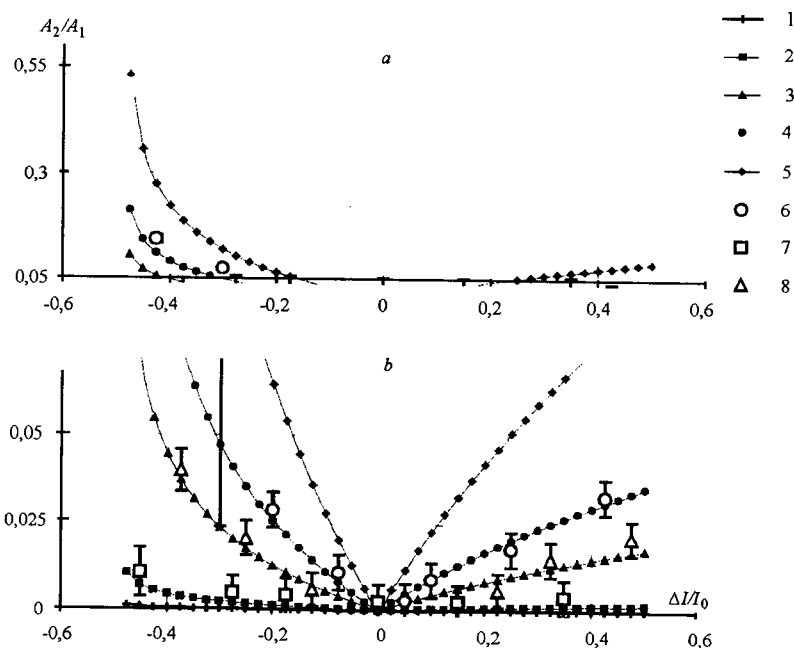


Рис. 5. Нелинейные искажения сигнала для метода стабилизации базы: кривая 1 – зависимость отношения A_2/A_1 от ΔI при $u = 1 \cdot 10^{-10}$ м; 2, 7 – при $u = 1 \cdot 10^{-9}$ м; 3, 8 – при $u = 1 \cdot 10^{-8}$ м; 4, 6 – при $u = 2 \cdot 10^{-8}$ м; 5 – при $u = 5 \cdot 10^{-8}$ м; кривые 1–5 – расчет

Расчетные кривые (1–4), полученные по этой формуле при соответствующих ΔI , A_0 и u , в пределах погрешностей совпадают с экспериментом.

Для второго и первого способов во всем исследованном диапазоне изменения u и I появления второй гармоники по уровню, превышающему ее уровень, во входном сигнале не обнаружено. Для метода стабилизации базы величина второй гармоники в зависимости от ΔI , и u достигает 50 % от амплитуды основной гармоники (рис. 5, a, b).

Проведенные измерения показали, что при изменении интенсивности излучения до 50 % от первоначального уровня суммарная погрешность определения смещений в УЗ-импульсе для второго способа при величине смещений в диапазоне $(0,5 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-8})$ м не превышает $0,05 \cdot 10^{-10}$ м. Оба рассматриваемых способа обеспечивают измерения с наименьшими нелинейными искажениями сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко А. Н., Дробот Ю. Б., Кондратьев А. И. Прецизионные акустические измерения оптическими и емкостными методами. Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1990.
2. Коронкевич В. П., Ханов В. А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985.
3. А. с. 1315793 СССР. Способ измерения колебаний объекта и устройство для его осуществления /А. Н. Бондаренко, А. И. Кондратьев, С. А. Гусаков. Опубл. 1987, Бюл. № 21.

4. А. с. 1415072 СССР. Интерференционный способ измерения малых ультразвуковых сигналов и интерференционное устройство для его осуществления /А. И. Кондратьев, С. А. Гусаков. Опубл. 1988, Бюл. № 29.
5. Титц У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982.
6. Шкарупин В. В., Донец В. Е., Тетерина Н. И. Широкополосное устройство выборки-хранения для анализа высокоскоростных процессов // ПТЭ. 1991. № 2. С. 103.

*Дальневосточный государственный университет
путей сообщения,
E-mail: kondr@dv.khv.ru*

*Поступило в редакцию
1 февраля 1999 г.*

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!