

На правах рукописи



ЧАНИЛОВ ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ
ВИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ
ФУРЬЕ - И ВЕЙВЛЕТ - ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

01.04.05 - оптика
01.04.03 - радиофизика

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов - 2005

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела
Саратовского государственного университета

Научные руководители: Заслуженный деятель науки РФ, доктор
физико-математических наук,
профессор *Усанов Д. А.*

доктор физико-математических наук, про-
фессор *Скрипаль А. В.*

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор *Ульянов С. С.*

доктор физико-математических наук,
профессор *Байбурин В. Б.*

Ведущая организация: Институт проблем точной механики и
управления РАН, г. Саратов.

Защита диссертации состоится 04 июля 2005 г. в 10 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д.212.243.01 по специальностям 01.04.05 - оптика,
01.04.03 - радиофизика по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СГУ

Автореферат разослан "1" июля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин В. М

Исследованию интерференции электромагнитных волн посвящено большое количество работ. Несмотря на многочисленность исследований, проводимых в этой области, явление интерференции продолжает интенсивно изучаться. Интерференционная картина является особенно сложной, когда исследуемый объект находится в движении. Несмотря на это, исследование интерференционной картины, порождаемой движущимся отражателем, вызывает широкий научный и технический интерес, так как позволяет фиксировать малые движения отражателя на значительных расстояниях от источника излучения, не оказывая при этом негативного влияния на исследуемый объект.

Методы измерения перемещений занимают важное место в современной науке и находят широкое применение в технике. При определении условий эксплуатации изделий различного рода возникает необходимость проведения испытания их на устойчивость к ударным механическим нагрузкам. Такие испытания могут способствовать выявлению их скрытых дефектов. Среди методов измерения перемещений, используемых для этих целей, наибольший интерес вызывают методы неразрушающего контроля, когда производимое измерение не оказывает негативного воздействия на объект исследований.

К таким методам, прежде всего, относятся оптические методы исследований. Эти методы основаны на анализе интерференционной картины, порождаемой падающей и отраженной исследуемым объектом электромагнитными волнами. Следует отметить, что интерференция, порождаемая падающей и отраженной объектом волнами СВЧ — диапазона, описывается теми же закономерностями, что и интерференция, порождаемая оптическими волнами.

Определение параметров движения объекта по регистрируемой интерференционной картине затруднено тем, что интересующую информацию несет фаза волны. В связи с этим является актуальным и приобретает большое значение разработка методов анализа интерференционной картины, позволяющих определять характеристики движения отражателя, являющегося одним из источников интерферирующих волн.

Ввиду высокой сложности регистрируемого сигнала исследования интерференции электромагнитного излучения, порождаемой движущимся отражателем, проводились для сравнительно узкого круга задач. Случай, когда наблюдаемый объект совершает гармонические колебания, изучен достаточно хорошо в работах Pernik В.Ј., Коронкевича В.П., Соболева В.С., Дубинцева Ю.Н., Ханова В.А. В ряде работ изложен набор методов, позволяющих по интерференционному сигналу в гомодинной интерференционной системе с гармонически движущимся отражателем определить частоту и амплитуду этого движения (Jin W., Zhang L. M., Uttamchandani D., Culshaw B., Вагарин В.А., Гангнус СВ.). В случае появления набора гармоник в колебании отражателя интерференционная картина резко усложняется. Характеристики интерференционного сигнала для такого движения отражателя изучены сравнительно слабо.

В ходе исследования различного рода механических систем на вибрационную стойкость и их реакцию на ударные нагрузки возникают непериодические движения внешнего отражателя. Характер интерференции для такого типа движений отражателя ранее не исследовался. Методы измерения

характеристик движения отражателя по интерференционному сигналу в гомодинной системе для этого случая разработаны не были.

Таким образом, актуальной задачей является исследование интерференции электромагнитного излучения в интерференционных системах для случая, когда их отражатели совершают сложные негармонические и непериодические колебания, и разработка методик восстановления характеристик движения отражателя по параметрам интерференционного сигнала.

Актуальность такого рода исследований обусловлена также возможностями, открывающимися при использовании в физическом эксперименте современных электронно-вычислительных машин для сбора и анализа экспериментальных данных, а также новых методов для анализа, фильтрации и синтеза сигналов.

Известные в настоящее время методы дешифровки интерференционного сигнала применимы только для анализа ограниченного набора типов движений объекта, самым сложным из которых является полигармоническое движение.

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы: исследование характеристик интерференционного сигнала автодинной системы при сложных непериодических движениях входящего в нее отражателя, в том числе возникающих при его ударном возбуждении, и разработка на их основе новых методов измерений параметров этих движений.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

- выявлены недостатки метода восстановления сложного движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье — преобразований конструируемой по интерференционному сигналу функции и предложены методы их устранения;
- предложен новый метод восстановления сложного движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье - преобразований;
- для случая, когда колебания отражателя в интерференционной системе представляют собой последовательность, каждая из составляющих которой является гармоническим сигналом, модулированным по амплитуде экспоненциально затухающей функцией, применение предложенного метода восстановления сложного движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье - преобразований конструируемой по интерференционному сигналу функции впервые позволило с высокой точностью восстановить закон колебания отражателя;
- предложен новый метод восстановления закона движения отражателя интерференционной системы, основанный на использовании вейвлет — преобразований конструируемой из сигнала функции;
- с помощью математического моделирования показано, что применение метода восстановления функции движения отражателя в интерференционной системе, основанного на вейвлет - преобразованиях, в случае, когда движение отражателя представляет собой гармонический сигнал, модулированный по амплитуде экспоненциально затухающей функцией, позволяет с более высокой точностью восстанавливать закон

движения отражателя, чем аналогичный метод, основанный на Фурье - преобразованиях;

- показано, что для случая, когда движение отражателя интерференционной системы может быть представлено рядом Фурье, применение вейвлет - метода обеспечивает меньшую точность восстановления закона движения отражателя, чем Фурье — метод;
- разработана экспериментальная установка исследования параметров движения объекта после его ударного возбуждения;
- впервые зафиксирован автодинный сигнал от интерференционной системы с ударно возбуждаемым внешним отражателем;
- разработанный метод вейвлет - анализа функции, конструируемой из интерференционного сигнала, полученного от движущегося отражателя, впервые применен для восстановления параметров движения ударно возбуждаемого отражателя по сигналу, полученному от лазерной автодинной интерференционной системы.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается строгостью используемых математических моделей, сходимостью вычислительных процессов к искомым решениям, соответствием результатов численного и натурального экспериментов.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением стандартной измерительной аппаратуры, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также соответствием результатов, полученных в ходе определения параметров движения отражателя с помощью автодинной интерференционной системы, результатам, полученным с помощью альтернативных способов измерения параметров вибраций объектов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- экспериментально показана возможность использования Фурье - анализа интерференционного сигнала для определения характеристик движения отражателя для случая, когда оно представляет собой гармонический сигнал, модулированный по амплитуде экспоненциально затухающей функцией;
- предложен новый алгоритм восстановления параметров сложного периодического движения объекта по интерференционному сигналу лазерной автодинной системы, основанный на вейвлет — анализе автодиного сигнала;
- на сконструированной в ходе выполнения работы установке удалось по сигналу автодинной измерительной системы, полученному при ударном возбуждении внешнего отражателя, определить характеристики движения отражателя;
- предложены пути повышения точности определения параметров движения, получаемых из анализа автодинного сигнала, зафиксированного с помощью разработанной установки.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Существует возможность экспериментального восстановления параметров колебания отражателя в автодинной системе, описываемых не только гармонической функцией, но и гармонической функцией, модулированной

- по амплитуде экспоненциально затухающей функцией, а также последовательностью, каждая из составляющих которой является гармонической функцией, модулированной по амплитуде экспоненциально убывающей функцией.
2. Использование предложенных в работе методов обработки автодинного сигнала позволяет с высокой степенью точности восстанавливать сложное негармоническое движение объекта, имеющее периодический характер.
 3. Определение характеристик колебательного движения ударно возбуждаемого отражателя по интерференционному сигналу, полученному от автодинной системы с полупроводниковым лазером, обеспечивается применением вейвлет - анализа.
 4. Применение вейвлет - анализа данных, полученных на основе экспериментально зафиксированного интерференционного сигнала, полученного от однократно ударно возбуждаемого отражателя в автодинной системе, позволяет с более высокой степенью достоверности восстановить закон движения отражателя, чем применение Фурье - анализа тех же данных.
 5. Для случая, когда движение отражателя носит периодический характер, применение вейвлет - анализа интерференционного сигнала позволяет восстанавливать движение отражателя с меньшей степенью точности, чем применение Фурье — анализа.

Апробация работы.

Результаты работы представлены на:

1. Международной школе молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофизике, Саратов, 2003;
2. Международной школе молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофизике, Саратов, 2004;
3. Федеральной итоговой научно-технической конференции творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам, Москва, 2004 г.
4. Семинарах кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Публикации. По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 5 работ, в том числе 2 статьи в центральной печати, 2 статьи в трудах конференций, 1 тезисы докладов.

Личный вклад автора выразился в теоретической разработке метода восстановления закона движения отражателя с помощью вейвлет - преобразований автодинного сигнала, проведении численного и натурного экспериментов, обработке их результатов, участии в формулировании научных положений и выводов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 114 страниц машинописного текста. Основной текст занимает 97 страниц, включая 25 рисунков. Список литературы содержит 197 наименований и изложен на 16 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена

практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации приведены результаты критического анализа исследований характеристик интерференции электромагнитного излучения в различных интерференционных системах с движущимся отражателем. Изложены методики, позволяющие по интерференционному сигналу восстанавливать более сложное движение наблюдаемого объекта, выявлены недостатки этих методик.

На основании проведенного анализа работ по решению обратных задач в интерферометрии при наличии движущегося отражателя сделан вывод о необходимости дальнейшего исследования в этой области.

Во второй главе представлены результаты исследования сигнала, формируемого в лазерной автодинной системе с движущимся внешним отражателем.

Нормированную переменную составляющую интерференционного сигнала, полученного в гомодинной интерференционной системе с колеблющимся внешним отражателем, можно записать в следующем виде:

$$U(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), \quad (1)$$

где X - длина волны излучения, $f(t)$ — функция движения объекта, которую можно представить в виде разложения в интеграл Фурье:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu, \quad (2)$$

здесь ν - частота колебаний исследуемого объекта, $c(\nu)$ - комплексная амплитуда механических вибраций на частоте ν .

Проведем дифференцирование интерференционного сигнала (1) с учетом представления (2):

$$\frac{dU(t)}{dt} = -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right) \int_{-\infty}^{\infty} i \frac{8\pi^2 \nu}{\lambda} c(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu. \quad (3)$$

Теперь введем в рассмотрение функцию $S(t)$, такую, чтобы ее спектр с точностью до постоянного множителя соответствовал спектру восстанавливаемого сигнала и запишем ее с учетом представления (3):

$$S(t) = \frac{dU(t)/dt}{\pm\sqrt{1-U^2}} = \int_{-\infty}^{\infty} i \frac{8\pi^2 \nu}{\lambda} c(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu. \quad (4)$$

Сравнив интегральные представления функций $f(t)$ и $S(t)$ (выражения (2) и (4) соответственно), можно заметить, что спектральные плотности этих функций отличаются множителем $i \frac{8\pi^2 \nu}{\lambda}$. Таким образом, построив на основе экспериментальных данных функцию $S(t)$, можно определить комплексные коэффициенты Фурье-разложения функции $f(t)$:

$$c(\nu) = \frac{\lambda}{i8\pi^2 \nu} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau) \exp(-i2\pi\nu \tau) d\tau$$

и, воспользовавшись представлением (2), восстановить функцию $f(t)$.

Необходимо отметить, что в приведенном алгоритме делается произвольное предположение о знаке функции $\pm\sqrt{1-U^2(t)}$ в нулевой момент времени. Это приводит к тому, что мы можем определить только вид функции, описывающей

движение объекта, но не направление движения. Поэтому описанный метод может быть с успехом использован в случаях, когда интерес представляет только зависимость величины смещения объекта от времени, а направление движения не является существенным.

Описанный выше метод имеет существенный недостаток. В моменты времени t_0 , когда $U(t_0) = 1$, конструируемая на основе интерференционного сигнала функция $S(t)$ терпит разрыв. Кроме того, наблюдается искажение значений функции $S(t)$ в некоторой окрестности обсуждаемых моментов времени. Использование такой $S(t)$ для определения параметров движения объекта приведет к искажению восстанавливаемого закона движения. Для применения описанного выше метода восстановления функции колебаний объекта с помощью спектрального анализа интерференционного сигнала необходимо использование непрерывной функции $S(t)$.

Для устранения разрывов и искажений функции $S(t)$ нами было высказано предположение о том, что разрывы и искажения функции $S(t)$ можно представить как аддитивный шум в полезном сигнале. Тогда задача устранения разрывов у обсуждаемой функции сводится к задаче ее фильтрации. Нами было разработано два способа фильтрации $S(t)$: с помощью спектрального анализа и с помощью цифровой медианной фильтрации по пяти точкам с последующими сглаживаниями кубическими сплайнами.

Для проверки описанного выше способа восстановления функции движения объекта нами было проведено численное моделирование восстановления заданной функции движения внешнего отражателя. В ходе моделирования задавалась функция $f(t)$, по которой с учетом выражения (1) рассчитывался интерференционный сигнал. Затем вычислялась функция $S(t)$ и решалась обратная задача: проводилось восстановление заданной функции $f(t)$ с использованием изложенной выше методики.

Вычисления производились с использованием математического пакета MATLAB 6.1. В ходе вычислений активно использовались встроенные в математический пакет функции прямого и обратного быстрого преобразования Фурье, а также медианной фильтрации и сглаживания кубическими сплайнами.

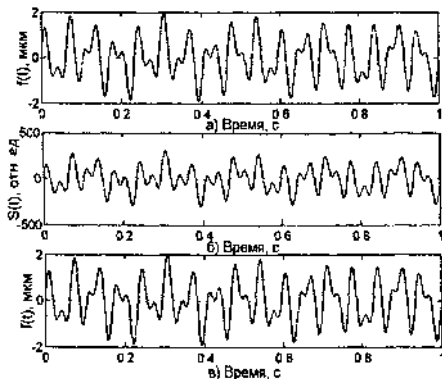


Рис. 1. а) – Исходная функция $f(t)$; б) – отфильтрованная функция $S(t)$, в) – восстановленная с помощью Фурье - преобразований функция $f(t)$.

На рис. 1, а приведен вид моделируемых колебаний объекта, на рис. 1, б - вид функции $S(t)$ после удаления разрывов и искажений медианным фильтром с последующим сглаживанием кубическими сплайнами, а на рис. 1, в - вид восстановленных колебаний объекта. Из рисунка видна высокая степень соответствия восстановленного сигнала исходному. Максимальная погрешность при восстановлении сигнала наблюдалась на начальном и конечном моментах интервала

времени, на котором определены колебания, и составила 4 процента, что, на наш взгляд, связано с погрешностью, вносимой фильтрацией функции $S(t)$. Таким образом, результаты численного моделирования показали, что для исследованного случая возможно успешное применение метода Фурье - анализа интерференционного сигнала с использованием вышеприведенных алгоритмов фильтрации функции $S(t)$ для определения параметров сложных колебаний объекта.

В третьей главе диссертационной работы изложен недостаток метода определения параметров движения отражателя, основанного на Фурье - анализе интерференционного сигнала, связанный с тем, что базисные функции, используемые при Фурье - анализе, не локализованы во временной области. Отсутствие такой локализации ведет к погрешностям в определении параметров движения отражателя для случая, когда колебания отражателя не являются периодическими. Поэтому при анализе интерференционного сигнала представляет интерес использование базисных функций, локализованных во временном и частотном пространствах, например, вейвлетов.

Функция, характеризующая продольные движения объекта, может быть представлена в интегральном виде:

$$f(t) = K_{\psi_1}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_1\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}, \quad (5)$$

где $C(a, b)$ — коэффициенты вейвлет - разложения $f(t)$ по базису ψ_j , определяемые по формуле:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

а K_{ψ_1} - постоянная величина, определяемая базисной вейвлет - функцией:

$$K_{\psi_1} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi_1(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega.$$

По аналогии с методом, описанным выше, введем в рассмотрение функцию $S(t)$, такую, чтобы ее спектр с точностью до постоянного множителя соответствовал спектру восстанавливаемого сигнала:

$$S(t) = \frac{dU/dt}{\pm\sqrt{1-U^2(t)}}$$

и запишем ее с учетом выражения для нормированной составляющей интерференционного сигнала (1):

$$S(t) = \frac{4\pi}{\lambda \cdot K_{\psi_1}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_2\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}, \quad (6)$$

где ψ_2 - производная от базисной вейвлет — функции ψ_1 .

Будем в дальнейшем рассматривать только такие вейвлет - функции $\psi_1(t)$, у которых существует производная, в свою очередь являющаяся вейвлетом. Сравнивая интегральные представления функций $f(t)$ и $S(t)$ (выражения (5) и (6) соответственно), можно увидеть, что они отличаются базисной вейвлет - функцией и постоянной величиной $\frac{4\pi}{\lambda}$. Построив на основе интерференционного сигнала(1) функцию $S(t)$, разложим ее по вейвлет- базису ψ_j для получения коэффициентов вейвлет - разложения $C(a, b)$:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda}{4\pi} \cdot S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_2\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (И)$$

Затем, используя полученные вейвлет - коэффициенты, выполним обратное преобразование, используя базис ψ_1 :

$$f(t) = K^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_1\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}. \quad (12)$$

Таким образом, с помощью вейвлет - преобразований интерференционного сигнала возможно определение параметров движения отражателя в интерференционной системе.

Для проверки изложенного метода была решена тестовая задача, в ходе которой рассматривался случай движения объекта, описываемого синусоидальной функцией $f(t)$, с предварительным вычислением интерференционного сигнала и последующим восстановлением по нему исходного сигнала. Обнаруженные в ходе моделирования разрывы функции $S(t)$ были устранены с помощью медианной фильтрации по пяти точкам с последующим сглаживанием кубическими сплайнами.

Решение обратной задачи проводилось с использованием метода восстановления сложного движения отражателя в интерференционной системе с помощью вейвлет - преобразований (вейвлет - метода). В ходе моделирования было установлено, что амплитуда восстановленного с помощью вейвлет — метода закона гармонического движения отражателя, отличается от амплитуды исходного закона движения отражателя не более чем на 5 %, а частота колебаний и их начальные фазы совпадают. Для сравнения рассматриваемая обратная тестовая задача была решена методом восстановления сложного движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье — преобразований (Фурье — метода). Отклонение амплитуды восстановленного с помощью Фурье - метода закона движения отражателя составило не более 3 % от амплитуды исходного закона, а отличия в частоте и фазе зафиксированы не были.

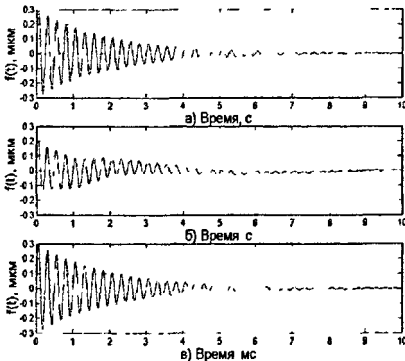


Рис. 2. а) - Исходный закон движения отражателя; б) - закон движения отражателя, восстановленный с помощью Фурье - метода; в) - закон движения отражателя, восстановленный с помощью вейвлет - метода

при доказательстве теорем о воз-

Также было проведено моделирование восстановления неперiodического движения объекта в интерференционной системе. В качестве пары базисных функций вейвлет - преобразования были использованы вейвлеты, конструируемые на основе первой и второй производных функции Гаусса. Выбор таких базисных вейвлетобразующих функций обусловлен простотой их описания, наглядностью и широкой распространенностью. Вместе с тем следует отметить, что вейвлеты на основе производных функции Гаусса не обладают свойством ортогональности, которое используется

возможности точного восстановления сигнала при проведении обратного вейвлет - преобразования. Поэтому необходимо иметь в виду, что обратное вейвлет — преобразование с их участием может не всегда приводить к точному восстановлению сигнала.

Проведенные расчеты для случая восстановления функции движения объекта, имеющей вид гармонического сигнала, модулированного по амплитуде экспоненциально затухающей функцией, показывают, что использование вейвлет - преобразования обеспечивает более высокую точность, чем использование Фурье - анализа. На рис. 2, а приведена функция движения объекта, на рис. 2,б- вид функции, восстановленной с помощью преобразований Фурье, а на рис. 2, в — вид функции, восстановленной с помощью вейвлет - преобразований. Из рисунков видно, что в данном случае использование в качестве базиса вейвлетобразующих функций позволяет добиться большего соответствия исходного и восстановленного сигналов.

В четвертой главе диссертационной работы описаны эксперименты по регистрации интерференционного сигнала, получаемого от движущегося отражателя. На рис. 3. представлена принципиальная схема экспериментальной установки. С выхода звуковой платы персонального компьютера 1 через кабель 2 на пьезокерамическую пластинку 3 с закрепленным на ней зеркалом подавался гармонический сигнал. Пьезокерамическая пластинка 3 вместе с оптическим автодином 4 была закреплена на оптической скамье. В автодине в качестве источника излучения оптического диапазона использовался лазерный диод типа RLD-650 на квантоворазмерных структурах с дифракционно - ограниченной одиночной пространственной модой, имеющий следующие характеристики: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм, пороговый ток 20 мА.

На пьезокерамическую пластину с персонального компьютера подавался аналоговый сигнал, что вызывало ее колебания по тому же закону. С автодина на

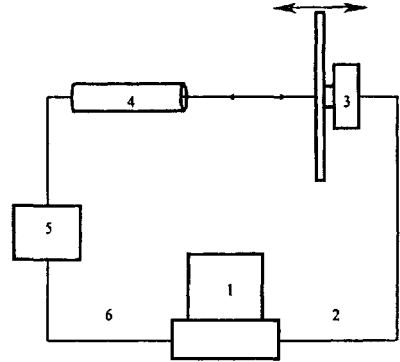


Рис 3 Принципиальная схема экспериментальной установки

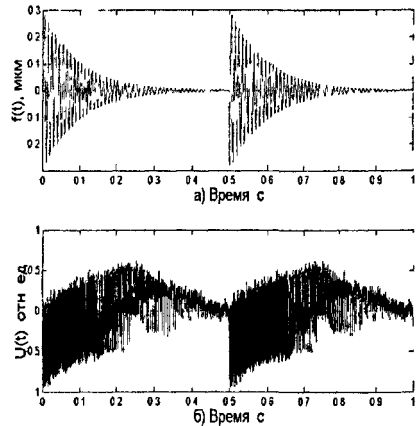


Рис 4 а) - Вид исходной функции $f(t)$, б) - зафиксированный автодинный сигнал

колеблющуюся пластину был направлен лазерный луч. Полученный автодинный сигнал через усилитель 5 подавался по кабелю 6 на аналогово-цифровой преобразователь персонального компьютера 1. После записи автодинного сигнала производилась его обработка с целью восстановления закона колебания отражателя

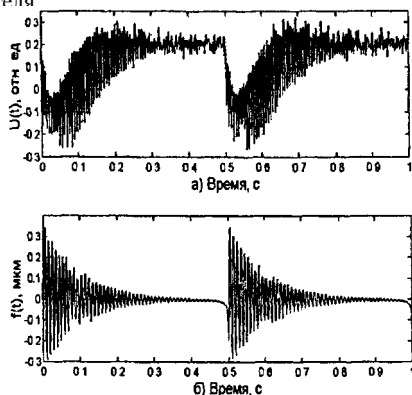


Рис. 5. а) - первые два периода сигнала $U(t)$ после фильтрации, б) - первый элемент последовательности функций $f(t)$.

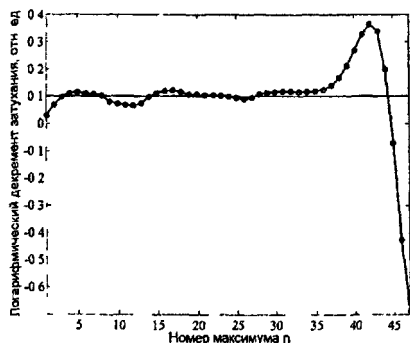


Рис. 6. Зависимость логарифмического декремента затухания для исходного (сплошная линия) и восстановленного (линия с кружками) сигналов от номера максимума.

сунка видно, что декремент затухания восстановленного сигнала осциллирует относительно декремента затухания исходного сигнала. При этом среднее значение декремента затухания восстановленного сигнала, вычисленное по всем максимумам, отличается от среднего значения декремента исходного сигнала на 4,3 процента. Таким образом, можно сделать вывод, что восстановленный сигнал с высокой степенью точности соответствует исходному.

Рассмотрен случай, когда движение отражателя представляет собой последовательность, каждая из составляющих которой является гармоническим сигналом, модулированным по амплитуде экспоненциально затухающей функцией. Вид закона движения представлен на рис. 4, а. На рис. 4, б приведен фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала. В ходе моделирования проводилась обработка зафиксированного сигнала с помощью медианной фильтрации по пяти точкам с последующим применением цифрового фильтра Савицкого - Голея. Отфильтрованный сигнал приведен на рис. 5, а. Определение параметров движения проводилось с использованием Фурье — метода. Восстановленный закон движения отражателя представлен на рис. 5, б. Сравнение частоты экспоненциально убывающих по амплитуде гармонических колебаний исходного и восстановленного сигналов показало, что отличие частоты находится в пределах погрешности измерений. На рис. 6 представлены зависимости логарифмического декремента затухания исходного и восстановленного сигналов, обозначенных сплошной линией и линией с кружками соответственно, от номера максимума для первых 47 максимумов. Из ри-

Также был выполнен эксперимент по исследованию сигнала, полученного в лазерной интерференционной системе с ударно возбуждаемым внешнем отражателем. Для регистрации такого сигнала нами была сконструирована экспериментальная установка, включающая в себя автодинную измерительную систему и ударный возбудитель механических колебаний.

Фрагмент зарегистрированного автодинной системой сигнала приведен на рис. 7. Из рисунка видно, что сигнал сильно зашумлен. Это, по-видимому, вызвано помехами в электрической сети, нестабильностью частоты излучения лазерного диода и механическими колебаниями экспериментальной установки.

Для снижения влияния посторонних шумов на восстанавливаемый сигнал нами была использована двухэтапная обработка регистрируемого автодинного сигнала. Для грубой фильтрации использовался цифровой фильтр Савицкого -

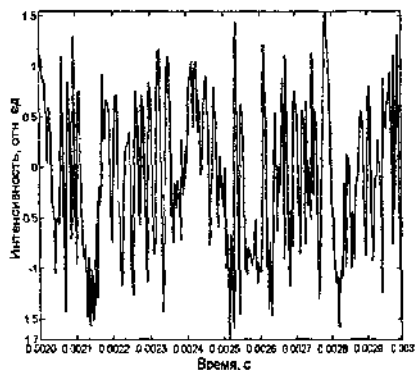


Рис 7 Фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала для случая, когда внешний отражатель подвергается одно-кратному ударному возбуждению.

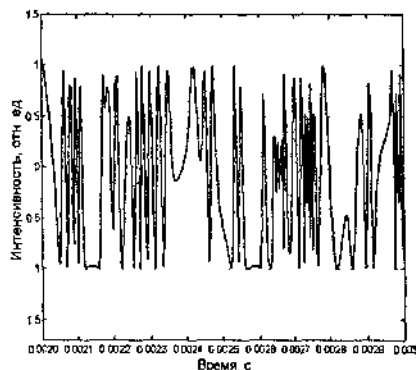


Рис. 8. Фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала после очистки от шумов.

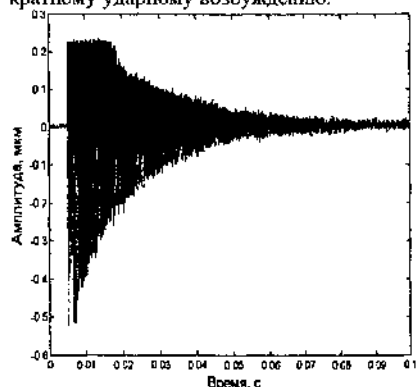


Рис 9 Вид восстановленного движения отражателя после его ударного возбуждения.

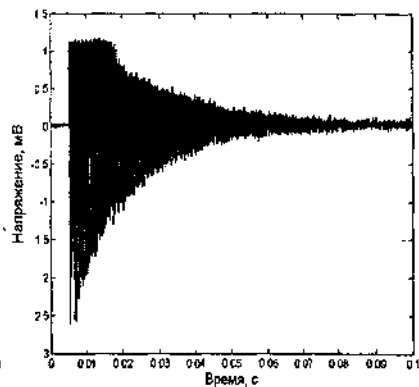


Рис. 10. Вид сигнала, зарегистрированного с индукционного датчика при ударном возбуждении внешнего отражателя автодинной системы.

Голея. Для более тонкой очистки автодинного сигнала от шумов использовалась вейвлет - фильтрация с помощью математического пакета Matlab. Фрагмент отфильтрованного сигнала приведен на рис. 8. Как видно из рисунка, большую часть шумов удалось удалить, не подвергнув существенным искажениям автодинный сигнал.

Зафиксированный в ходе эксперимента автодинный сигнал после предварительной очистки от шумов был обработан по вейвлет - методу, изложенному выше, с целью решения обратной задачи - восстановления функции, характеризующей распространение ударной волны в твердом теле. Вид восстановленного по автодинному сигналу закона колебания твердого тела после ударного механического воздействия показан на рис. 9. Из рисунка видно, что характер распространения ударных волн в твердом теле подобен виду колебаний, возникающих при однократном возбуждении колебательных контуров с потерями.

Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью описанного метода, нами был выполнен эксперимент по регистрации параметров распространения ударных волн в твердом теле с помощью индукционного метода. Для этого ударно возбуждаемый металлический стержень был помещен в индукционный датчик, подключенный к входу аналого-цифрового преобразователя, соединенного с персональным компьютером.

Колебания стержня при распространении в нем ударной волны вызывали электродвижущую силу самоиндукции в катушке индуктивности, являющейся составной частью индукционного датчика, которую фиксировал аналого-цифровой преобразователь. Конструкция возбудителя колебаний обеспечивала одинаковые параметры возбуждения отражателя. Зависимость значения электродвижущей силы самоиндукции, пропорциональной величине смещения стержня, от времени приведена на рис. 10.

Сопоставление результатов, приведенных на рис. 9 и 10, свидетельствует о высокой степени соответствия параметров колебаний, полученных в результате использования интерференционного и индукционного методов измерений.

В заключении приведены **основные результаты диссертационной работы**, которые заключаются в следующем:

1. Показана возможность экспериментального восстановления параметров колебания отражателя в автодинной системе с помощью Фурье - анализа регистрируемого сигнала для случаев, когда движение отражателя представляет собой гармоническую функцию и последовательность, каждая из составляющих которой является гармоническим сигналом, модулированным по амплитуде экспоненциально убывающей функцией. Также показано, что применение цифровой фильтрации фиксируемого автодинного сигнала позволяет повысить степень соответствия восстанавливаемого сигнала исходному.
2. Предложен новый метод восстановления закона движения отражателя интерференционной системы, основанный на использовании вейвлет — преобразовании конструируемой из сигнала функции.
3. Показано, что для случая, когда движение отражателя в интерференционной системе представляет собой гармонический сигнал, модулированный по амплитуде экспоненциально затухающей функцией, что примерно соответствует колебаниям в электромагнитном контуре с потерями после его однократного возбуждения, вейвлет - преобразования интерференционного

сигнала позволяют с более высокой степенью точности восстановить закон движения отражателя, чем Фурье - преобразования. Показано, что для случая, когда движение отражателя может быть представлено рядом Фурье, применение вейвлет - метода обеспечивает меньшую точность восстановления закона движения отражателя, чем Фурье - метод.

4. Разработана экспериментальная установка исследования параметров движения объекта после его ударного возбуждения и впервые зарегистрирован сигнал автодиной системы с ударно возбуждаемым внешним отражателем.
5. С помощью предложенного автором нового метода решения обратной задачи с помощью вейвлет - преобразований интерференционного сигнала впервые проведено восстановление закона движения ударно возбуждаемого отражателя в лазерной автодинной системе.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Chanilov O. I., Usanov D. A., Skripal A. V. Motion function reconstruction by using wavelet transform // Proc. SPIE. - 2004. - Vol. 5475. - P. 136 - 140.
2. Chanilov O. I., Usanov D. A., Skripal A. V. Reconstruction of object nonharmonic motion function by diode laser signal operating in autodyne regime // Proc. SPIE.-2005.-Vol. 5772.-P. 196-201.
3. Скрипаль А. В., Чанилов О. И., Усанов Д. А. Восстановление траекторий движения объекта по результатам анализа интерференционного сигнала с помощью вейвлет - преобразований // Автометрия. - 2004. - Т. 40, № 5. - С. 56 - 62.
4. Скрипаль А. В., Чанилов О. И., Усанов Д. А., Камышанский А. С. Восстановление негармонической функции движения объекта по сигналу полупроводникового лазера, работающего в автодином режиме // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. - 2005. - № 1. - С. 62 - 70.
5. Машков Д.А., Камышанский А С, Чанилов О.И., Постельга А.Э. Лазерная и СВЧ автодиная интерферометрия вибраций // Федеральная итоговая научно-техническая конференция творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам: материалы конф. - М, 2003.-С. 52-54.

Подписано в печать 30 05 05
Формат 60\84 1/16 Объем 1,0 п л Тираж ЮОЭкз Заказ №3.

Типография Издательства Саратовского университета
410012, Саратов, Астраханская, 83

14 MAR 2005

