

05.1;07

Вейвлет-анализ лазерного интерференционного сигнала при ударном возбуждении отражателя

© О.И. Чанилов, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.С. Камышанский

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: Usanov DA@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 11 апреля 2005 г.

Показано, что применение вейвлет-анализа лазерного интерференционного сигнала, получаемого от системы, подвергаемой ударным нагрузкам, позволяет определять абсолютные значения характеристик распространения ударных волн в твердом теле. Приведены результаты экспериментального исследования параметров затухающих колебаний, возникающих в металлическом стержне после однократного механического ударного воздействия.

Введение. Анализ механических колебаний, возбуждаемых ударным воздействием в твердотельных элементах различного назначения, представляет интерес при изучении физики возбуждения ударных волн в твердом теле и при определении работоспособности изделий, функционирующих в условиях ударных нагрузок. Обычно при определении реакции на удар применяют акустические датчики, использование которых для определения характеристик возникающих механических колебаний предполагает предварительную их калибровку. Возможность определения абсолютных значений характеристик колебаний твердотельных элементов, возбуждаемых ударным воздействием без предварительной калибровки, открывается при использовании лазерной интерферометрии.

Методы решения обратных задач в лазерной интерферометрии хорошо разработаны для случая, когда колебания отражающей поверхности являются периодическими [1–3]. В этом случае для определения характеристик колеблющихся систем используется Фурье-анализ экспериментально получаемого интерференционного сигнала. Колебания поверхности твердого тела, возникающие как реакция на удар, являются аperiodическими и схожими с процессами, возникающими в колебательных контурах с потерями после однократного возбуждения.

В настоящей работе показана возможность определения характеристик колебаний ударно возбуждаемой поверхности твердого тела в результате использования вейвлет-анализа интерференционного сигнала [4,5], полученного от автодинной системы с ударно возбуждаемым внешним отражателем.

1. Теоретическое описание метода. Нормированную переменную составляющую интерференционного сигнала в автодинной системе с коэффициентом обратной оптической связи $C \ll 1$ можно записать в виде [6]

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

где t — время, θ — фаза сигнала, λ — длина волны лазерного излучения, $f(t)$ — функция, характеризующая продольные движения объекта, которая может быть представлена в виде:

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

где

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_1 \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

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

Здесь ψ_1 — базисная вейвлет-функция, $C(a, b)$ — коэффициенты вейвлет-разложения функции $f(t)$ по базису ψ_1 , K_{ψ_1} — постоянная величина, определяемая базисной вейвлет-функцией, $\psi_f(\omega)$ — Фурье-образ функции ψ_1 .

Для того чтобы равенство (2) выполнялось, необходимо, чтобы функция ψ_1 обладала свойствами вейвлета, т.е. была локализована во временном и частотном пространствах, имела нулевое среднее во всем временном интервале и была ограничена.

Введем в рассмотрение функцию $S(t)$ такую, чтобы ее спектр с точностью до постоянного множителя соответствовал спектру восстанавливаемого сигнала [1]:

$$S(t) = \frac{dU/dt}{\pm \sqrt{1-U^2(t)}}, \quad (3)$$

и запишем ее с учетом выражения (1) и интегрального представления функции $f(t)$ (2):

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

где ψ_2 — производная от базисной вейвлет-функции ψ_1 .

Для определения знака функции $\pm \sqrt{1-U^2(t)}$ можно использовать следующую процедуру. По функции $U(t)$ вычисляются значения $\sqrt{1-U^2(t)}$. В первой точке знак квадратного корня задается произвольно. Затем определяется знак функции dU/dt , и при построении $\pm \sqrt{1-U^2(t)}$ ее знак меняется на противоположный в тех точках, где dU/dt равна нулю. Если полученная таким образом функция имеет разрывы, тогда на участке между разрывами знак функции меняется на противоположный. Выполнение этой процедуры ведет к получению непрерывной функции $\pm \sqrt{1-U^2(t)}$ с учетом знака.

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 (2) и (4) 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_2 для получения коэффициентов вейвлет-разложения $C(a, b)$:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda}{4\pi} \cdot S(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_2 \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (5)$$

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

$$f(t) = K_{\psi_1}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_1 \left(\frac{t-b}{a} \right) \frac{dadb}{a^2}. \quad (6)$$

Таким образом, используя интерференционный сигнал, мы можем определить вид функции, описывающей смещение участка объекта, от

которого отражается лазерный луч, формирующий картину интерференции. Произвольность предположения о знаке функции $\pm\sqrt{1-U^2(t)}$ в первой точке приводит к тому, что мы не можем восстановить направление движения объекта. Однако описанный метод может быть с успехом использован в случаях, когда направление движения объекта в начальный момент времени известно, либо когда интерес представляет только зависимость величины смещения объекта от времени, а направление движения не является существенным.

2. Результаты эксперимента. Для исследования колебаний, возникающих в твердом теле под действием ударных нагрузок, с помощью автодиной системы нами был выполнен натурный эксперимент на специально сконструированном ударном стенде.

Принцип работы экспериментальной установки заключался в следующем. На оптической скамье устанавливались ударный стенд и оптический автодин. Ударный стенд представлял собой боек, приводимый в действие пружиной, усилие сжатия которой можно контролировать изменением положения толкателя, ручкой, и жестко закрепленный металлический стержень, на который передавалась ударная нагрузка от бойка. Таким образом, в эксперименте подлежало измерению смещение торцевой поверхности стержня, связанное с изменяющейся во времени деформацией, вызываемой ударной нагрузкой. В автодине в качестве источника излучения оптического диапазона использовался лазерный диод типа RLD-650 на квантово-размерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой, имеющий следующие характеристики: мощность излучения 5 mW, длина волны 652 nm, пороговый ток 20 mA. С автодина на торец металлического стержня направлялся лазерный луч. Полученный автодинный сигнал через усилитель подавался на аналогово-цифровой преобразователь персонального компьютера. После записи автодинного сигнала производилась его обработка с целью восстановления закона движения стержня после передачи на него ударного импульса от бойка.

Для снижения влияния шумов электрической сети на регистрируемый сигнал в качестве источника питания лазера, работающего в автодинном режиме, использовалась аккумуляторная батарея. Коэффициент отражения металлического стержня и расстояние от стержня до источника излучения были подобраны таким образом, чтобы для коэффициента обратной оптической связи S выполнялось условие $S \ll 1$. Фрагмент зарегистрированного фотоприемником сигнала приведен на рис. 1. Из рисунка видно, что сигнал сильно зашумлен. Это,

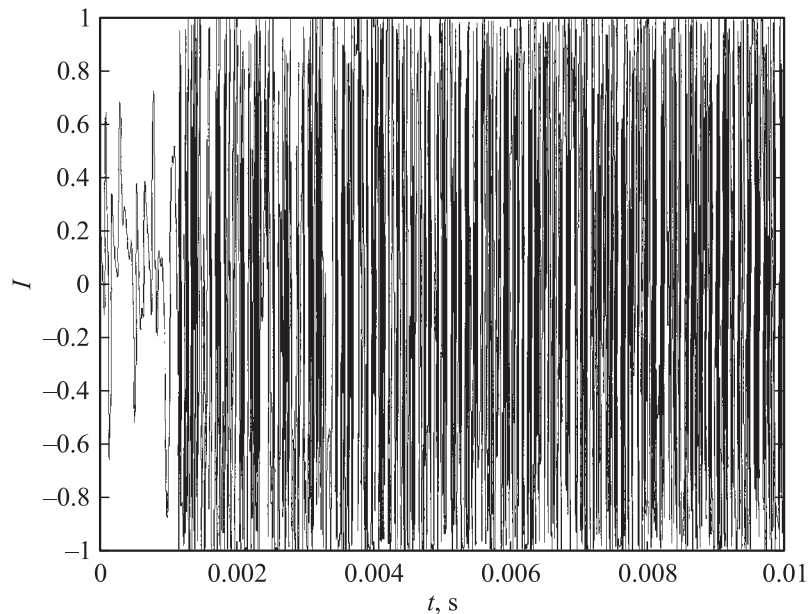


Рис. 1. Фрагмент зарегистрированного автодинного сигнала.

по-видимому, вызвано нестабильностью частоты излучения лазерного диода, механическими колебаниями экспериментальной установки и помехами в электрической сети.

Для снижения влияния посторонних шумов на восстанавливаемый сигнал нами была использована двухэтапная обработка регистрируемого автодинного сигнала. Для грубой фильтрации использовался цифровой фильтр Савицкого–Голея [7]. Для более тонкой очистки автодинного сигнала от шумов использовалась вейвлет-фильтрация с помощью математического пакета Matlab [8,9].

Зафиксированный в ходе эксперимента интерференционный сигнал после цифровой фильтрации был подвергнут описанным в первом разделе данной работы преобразованиям 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. 2.

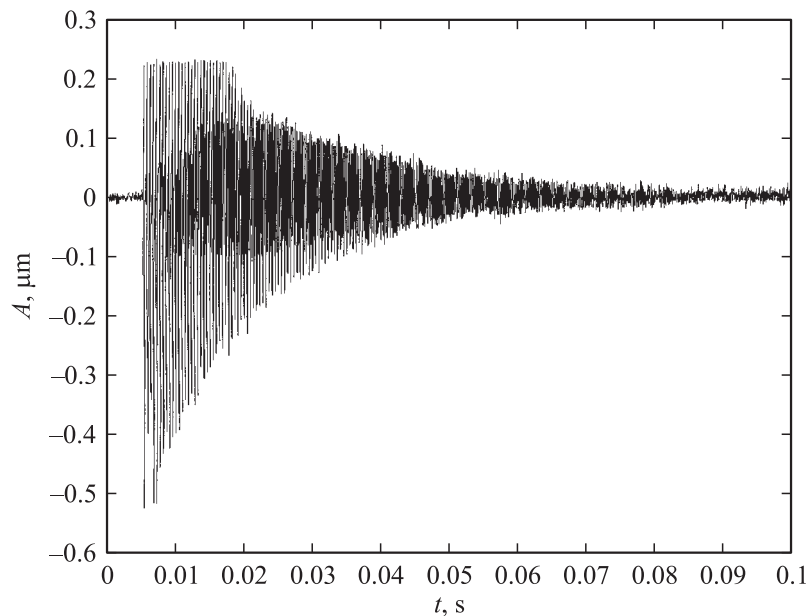


Рис. 2. Восстановленный закон колебания твердого тела после ударного механического воздействия.

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 так называемого индукционного метода. Для этого ударно возбуждаемый металлический стержень был помещен в индукционный датчик, подключенный к входу аналогово-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 аналогово-цифровой преобразователь. Усилие сжатия пружины, приводящей в действие боек ударного стенда, устанавливалось таким же, как и в

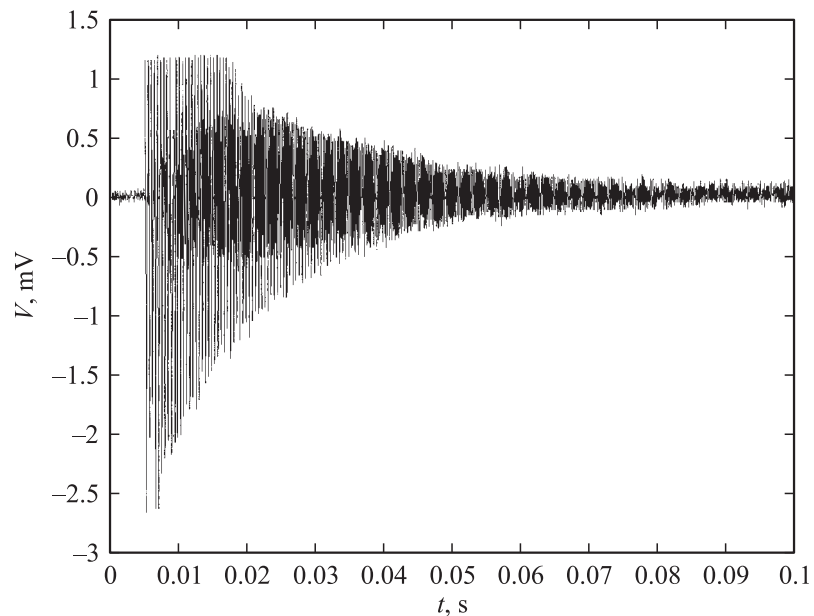


Рис. 3. Зависимость напряжения от времени, регистрируемая индукционным датчиком при ударном возбуждении отражателя.

эксперименте с автодином. Зависимость значения электродвижущей силы самоиндукции, пропорциональной величине смещения стержня, от времени приведена на рис. 3. Сопоставление результатов, приведенных на рис. 2 и 3, позволяет установить, что частота и логарифмический декремент затухания колебаний при распространении ударной волны, зафиксированные с помощью интерференционного метода, отличаются не более чем на 0.5 и 1.2% соответственно от частоты и логарифмического декремента затухания, зарегистрированных при применении так называемого индукционного метода. Это свидетельствует о высокой степени соответствия параметров колебаний, полученных в результате использования интерференционного и так называемого индукционного методов измерений.

Ограничения в использовании предложенного метода связаны с конечным периодом дискретизации регистрируемого автодинного сигнала, обеспечиваемым существующими аналогово-цифровыми преобразовате-

лями (АЦП). В частности, с ограниченностью в быстродействии АЦП связана невозможность измерения ударных волн с временем нарастания фронта меньшим, чем период дискретизации. При медленном нарастании фронта волны более целесообразно использовать методику, предложенную в [10].

Заключение. Таким образом, показана возможность определения параметров ударных волн в твердом теле в результате применения вейвлет-анализа интерференционного сигнала, полученного от автодиной системы с полупроводниковым лазером и ударно возбуждаемым внешним отражателем.

Список литературы

- [1] Гангнус С.В., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. // Автометрия. 1999. № 1. С. 31–37.
- [2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Гангнус С.В. // Автометрия. 2001. № 1. С. 117–122.
- [3] Gangnus S.V., Usanov D.A., Skripal A.V. // Proc. SPIE. 1999. V. 3726. P. 226–231.
- [4] Астафьева Н.М. // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1154.
- [5] Скрипаль А.В., Усанов Д.А., Чанилов О.И. // Автометрия. 2004. № 5. С. 56–61.
- [6] Wang Z., Graca M.S., Bryanston Cross P.J. et al. // Opt. Eng. 1996. V. 35. N 8. P. 2327–2334.
- [7] Savitzky A., Golay M. // Anal. Chem. 1964. V. 36. N 8. P. 1627–1630.
- [8] Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 408 с.
- [9] Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН, 2002. 324 с.
- [10] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 7. С. 77–82.