

УДК 519.688+534.6.08+534.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

*Е. А. Букварёв*¹, *М. В. Мартынюк*^{1*}, *Л. А. Пасманик*², *В. А. Смирнов*²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева;

² ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Россия

В статье рассматривается способ определения задержки распространения ультразвуковых волн при измерении механических напряжений, основанный на многоканальной согласованной фильтрации. Обоснована целесообразность графического представления результатов в виде поверхности «интервал—задержка». Приведены экспериментальные результаты.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно широко применяются методы неразрушающего контроля, основанные на зависимости скорости распространения поляризованных ультразвуковых волн от действующих в материале напряжений и его состояния [1]. Фактически при этом измеряются времена задержки распространения в материале эхосигналов, формируемых двумя ортогональными сдвиговыми и одной продольной ультразвуковыми волнами (модами). Практическую сложность представляет определение параметров каждой из этих одновременно присутствующих мод. Для решения данной задачи предлагается использовать многоканальную согласованную фильтрацию сигнала. Такой способ обработки сигналов позволяет существенно повысить точность измерения скоростей распространения каждой моды, что особенно важно при диагностике состояний материалов.

Предложено представление результатов в виде поверхности «интервал—задержка», свободное от недостатков, присущих традиционным способам представления результата обработки как функции времени. Такой подход позволяет оптимизировать выбор параметров измерений и обработки и обеспечивает возможность адекватной оценки получаемых результатов и правильности выбора параметров измерений в условиях одновременного наличия нескольких мод и помех.

Приведены экспериментальные результаты, полученные при измерении напряжений в металлической заготовке при её силовом нагружении. При этом сигнал представлял собой суперпозицию двух последовательностей радиоимпульсов с разными интервалами повторения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется последовательность из N_R радиоимпульсов с центральной частотой f , одинаковыми начальными фазами и амплитудами A и интервалом повторения T_c . Значения этих параметров предполагаются неизменными. Шум отсутствует. Требуется определить интервал повторения T_c . Необходимо рассмотреть случай суммы двух таких последовательностей, отличающихся амплитудой и интервалом повторения, и определить разрешающую способность по величине T_c .

* m_mart@mail.ru

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛА ПОВТОРЕНИЯ

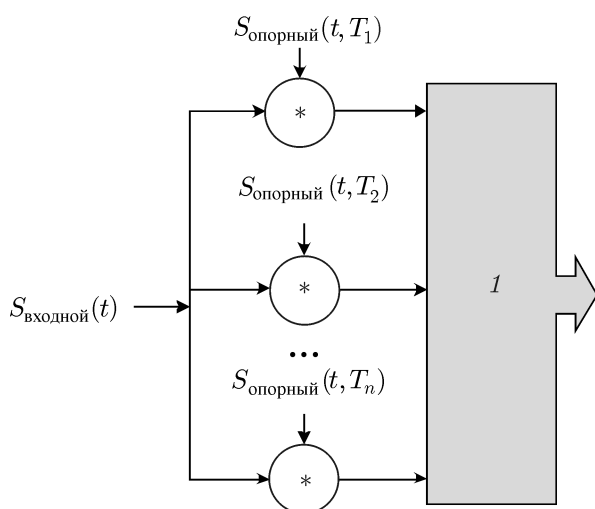


Рис. 1. Структурная схема многоканального фильтра: 1 — блок принятия решения

Исходя из того, что по условию все параметры сигналов являются детерминированными, решение данной задачи становится вариационным относительно интервала повторения T и времени запаздывания τ . Можно сказать, что данные параметры образуют совокупный векторный параметр входного сигнала $\alpha_c = (T_c, \tau_c)$, который рассогласован по отношению к ожидаемому значению $\alpha = (T, \tau)$. Отличие параметров α_c и α оценивают по виду сигнала рассогласования $\psi(\alpha_c, \alpha)$ на выходе устройства оптимальной обработки при отсутствии помех. Амплитуда входного сигнала является масштабирующим параметром, относительно которого результаты будут инвариантны, иначе говоря, этот параметр можно не учитывать. Устройство должно быть оптимизировано для приёма ожидаемого сигнала.

Следовательно, требуется определить ненормированную функцию рассогласования [2]

$$\psi(\alpha_c, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{вх}(t, \alpha_c) S_{опорный}^*(t, \alpha) dt. \tag{1}$$

Вторая компонента, τ , искомого вектора α является непрерывной величиной, а первую составляющую, для упрощения представления функции неопределённости, удобно сразу взять в виде дискретного ряда $T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max}$, где $i = 1, \dots, 2, \dots$. Тогда опорный сигнал можно представить в виде множества $S_{опорный} = \{t, (T_i, \tau)\}$, элементом которого является непрерывный сигнал вида

$$S_{опорный}(t, \alpha_i) = S_{опорный}[t, (T_i, \tau)] = S_{опорный}(t - \tau, T_i). \tag{2}$$

Подставляя (2) в (1), получаем выражение

$$\psi(\alpha_c, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{вх}(t, \alpha_c) S_{опорный}^*(t - \tau, T_i) dt, \tag{3}$$

описывающее структуру многоканального обнаружителя, показанного на рис. 1. Очевидно, что выражение (3) представляет собой интеграл свёртки относительно величины τ :

$$\psi(\alpha_c, \alpha) = S_{вх}(t, \alpha_c) * S_{опорный}^*(t, T_i).$$

Введём импульсную функцию идеализированного тракта в виде периодической последовательности дельта-импульсов:

$$h(t, \alpha) = \sum_{k=0}^{N_R-1} \delta(t - kT_i - \tau).$$

Тогда опорный сигнал удобно представить в виде интеграла свёртки с зондирующим сигналом:

$$S_{опорный}(t, \alpha) = s(t) * h(t, \alpha). \tag{4}$$

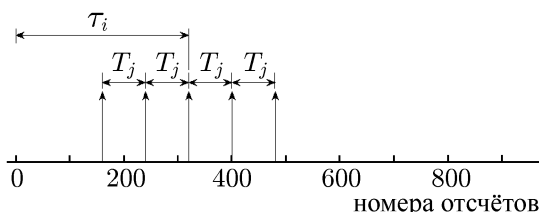


Рис. 2. Схема импульсной функции гребёчатого фильтра

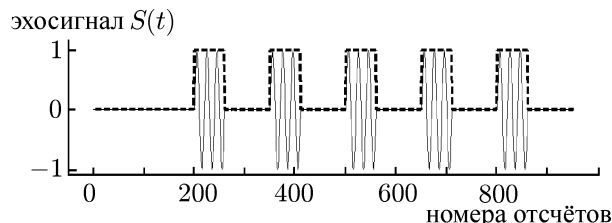


Рис. 3. Периодическая последовательность радио- (сплошная линия) и видеоимпульсов (пунктир)

Отметим, что компонент $s(t)$ не зависит от α и при подстановке выражения (4) в (3), с учётом линейности операции свёртки по каждому аргументу, можно записать

$$\psi(\alpha_c, \alpha) = [S_{\text{вх}}(t, \alpha_c) * s^*(t)] * h^*(t, \alpha).$$

Данное выражение описывает более простую схему многоканального обнаружителя, в котором вначале реализуется согласованная фильтрация с зондирующим радиоимпульсом, а затем — вариационный анализ применения операции

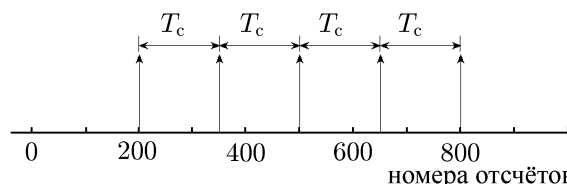


Рис. 4. Схема выровненной импульсной функции идеального ревербирующего тракта

$$U_{\Sigma}(T_j, \tau_i) = \sum_{k=0}^{N_R-1} C_k S \left[\tau_i + T_j \left(k - \frac{N_R - 1}{2} \right) \right], \tag{5}$$

где $S(t)$ — анализируемый сигнал, C_k — весовые коэффициенты (далее весовое окно) гребёчатого фильтра, N_R — количество импульсов, T_j — интервал их повторения, а τ_i — задержка фильтра. Операция (5) описывает прохождение сигнала через набор гребёчатых фильтров, импульсная функция одного из которых представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлены периодические последовательности радио- и видеоимпульсов (далее эхосигнал $S(t)$) с единичными амплитудами — результат свёртки отдельного зондирующего сигнала $s(t)$ (радио- или видеоимпульса) с выровненной по амплитуде импульсной функцией идеализированного тракта, представленной на рис. 4.

Выходной сигнал многоканального фильтра (5) является функцией двух аргументов и поэтому может быть представлен с помощью поверхности Назовём такое двумерное многообразие поверхностью «интервал—задержка». На рис. 5а и б представлены поверхности «интервал—задержка», полученные в результате обработки в соответствии с формулой (5) сигналов, изображённых на рис. 3. Вдоль оси абсцисс (горизонтальная ось на рис. 5а и б) отложен интервал повторения T_j , где j — номер канала многоканального фильтра (5), вдоль оси ординат (вертикальная ось на рис. 5а и б) отложены отсчёты времени (τ_i — задержка распространения), вдоль оси аппликат отложены значения функции $U_{\Sigma}(T, \tau)$ (значения отображаются посредством оттенка серого).

3. СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ «ИНТЕРВАЛ—ЗАДЕРЖКА»

Введём функцию $N(T, \tau)$ (см. рис. 5б и г) — результат обработки в соответствии с формулой (5) последовательности прямоугольных видеоимпульсов, показанных на рис. 3. Значение

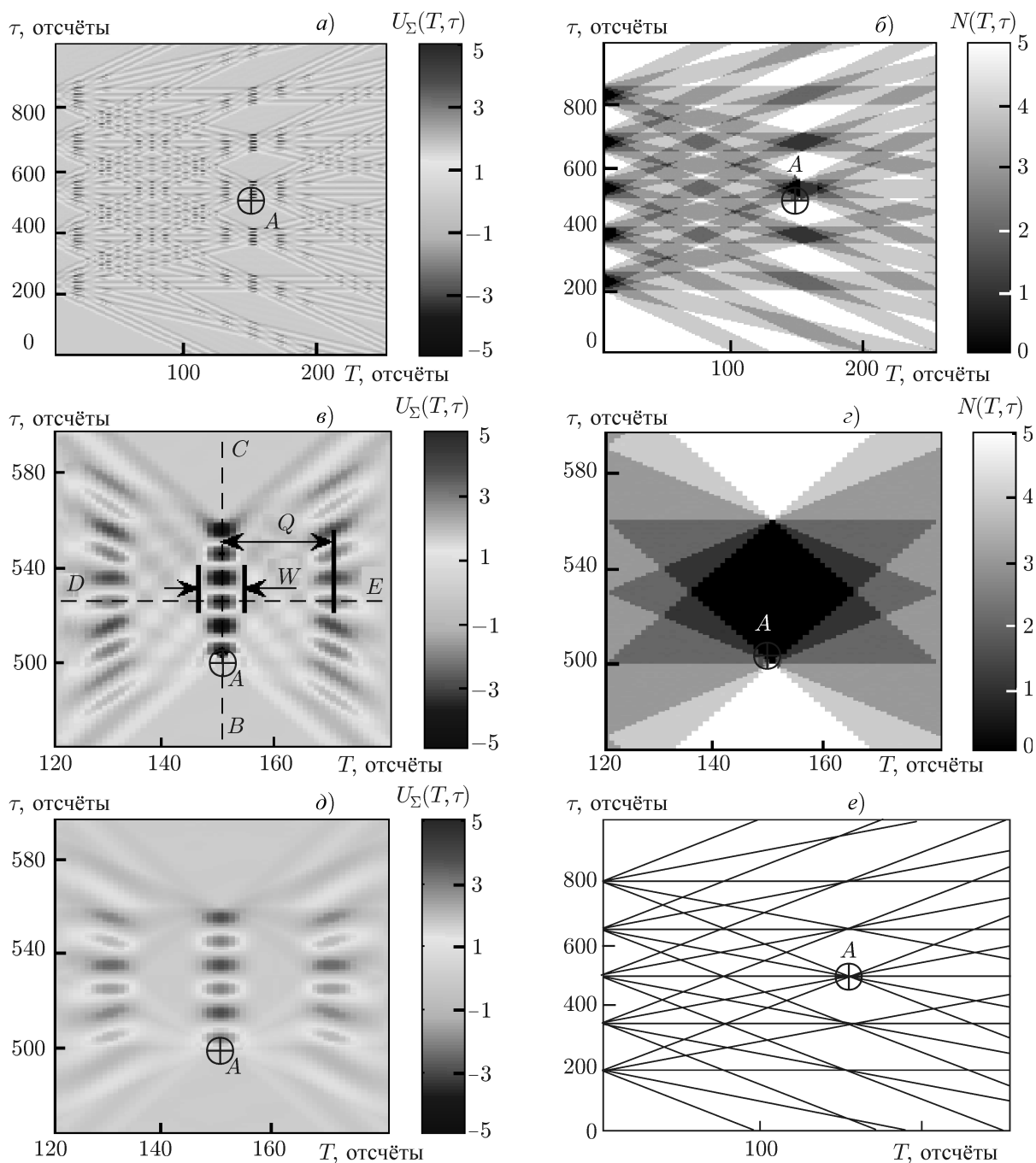


Рис. 5. Примеры поверхностей «интервал—задержка»: а — поверхность «интервал—задержка», полученная при обработке радиоимпульсов, показанных на рис. 3; б — поверхность «интервал—задержка» полученная при обработке видеоимпульсов, показанных на рис. 3; в — участок поверхности с панели а в окрестности точки А; г — участок поверхности с панели б в окрестности точки А; д — участок поверхности «интервал—задержка» в окрестности точки А, полученный при обработке радиоимпульсов, показанных на рис. 3, с использованием окна Ханна в качестве весового окна гребёчатого фильтра; е — результат обработки в соответствии с формулой (5) сигнала, изображённого на рис. 4

$N(T, \tau)$ численно равно количеству переотражённых радиоимпульсов (реплик), принимавших участие в формировании соответствующего значения $U_{\Sigma}(T, \tau)$ (см. рис. 5а и б).

Из рис. 5б очевидно, что на поверхности «интервал—задержка» наибольшей информативностью обладает область суммирования всех N_R реплик (окрестность точки A на рис. 5б), координаты которой есть

$$A_X = T_c, \quad A_Y = (N_R - 1) T_c / 2.$$

Далее гребёночную область в окрестности точки A будем называть главным (или основным) лепестком функции рассогласования (поверхности «интервал—задержка»).

Сечение BC (рис. 5в) поверхности «интервал—задержка» в окрестности точки A соответствует сумме N_R импульсов $s(t)$ эхосигнала $S(t)$, совмещённых по фазе. При параллельном сдвиге секущей плоскости BC вдоль оси абсцисс сечение представляет собой сумму $N(T, \tau)$ рассогласованных по фазе реплик.

Полагая все реплики в эхосигнале одинаковыми, представим функцию $U_\Sigma(\Delta T, \Delta \tau)$ в виде суммы

$$U_\Sigma(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) = \sum_{k=0}^{N(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) - 1} C_k P \left[\Delta \tau + \Delta T \left(k - \frac{N_R - 1}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

Если каждая из реплик $s(t)$ эхосигнала $S(t)$ является радиоимпульсом с частотой заполнения f , то формула (6) примет вид

$$U_\Sigma(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) = \sum_{k=0}^{N(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) - 1} C_k \sin[2\pi f \Delta T k + \varphi(\Delta T, \Delta \tau)], \quad (7)$$

где $\varphi(\Delta T, \Delta \tau) = 2\pi f[\Delta \tau - \Delta T(N_R - 1)/2]$.

3.1. Определение ширины W главного лепестка (рис. 5в)

Из формулы (7) видно, что сечение поверхности «интервал—задержка», параллельное оси абсцисс (например сечение DE главного лепестка в окрестности точки A на рис. 5в), представляет собой проекцию фурье-образа весового окна гребёночного фильтра (C_k , $k = 0, 1, \dots, N_R - 1$) и при единичном весовом окне пропорционально функции

$$\frac{\sin(\pi \Delta T N_R f)}{\pi \Delta T N_R f}.$$

Таким образом, если коэффициенты $C_k = \text{const}$, для $k = 0, 1, \dots, N_R - 1$ (т.е. весовое окно гребёночного фильтра является прямоугольным), то значение функции $U_\Sigma(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) = 0$, если аргумент $2\pi f \Delta T k$ для индекса k от 0 до $N(T, \tau) - 1$ будет «пробегать» целое число периодов, т.е.

$$\Delta T N(A_X + \Delta T, A_Y + \Delta \tau) = \pm n f^{-1},$$

$n = 1, 2, 3, \dots$. Для области суммирования всех реплик (окрестность точки A , где $N(T, \tau) = N_R$) ширина W главного лепестка (на рис. 5в) вычисляется по формуле

$$W = 2/(f N_R). \quad (8)$$

3.2. Определение верхней границы числа реплик N_R

Чтобы частота f_T дискретизации сечения DE (или частота дискретизации поверхности «интервал—задержка» по оси абсцисс) была достаточной, необходимо, в соответствии с теоремой Котельникова, обеспечить выполнение неравенства $f_T^{-1} \leq W/2$. Из формулы (8) следует, что

$$N_R \leq f_T/f. \quad (9)$$

3.3. Определение интервала T_c повторения реплик

Абсциссе максимума главного лепестка A_X соответствует интервал T_c , обеспечивающий согласование фаз всех N_R реплик. Поэтому, определив A_X , мы находим интервал повторения реплик.

Применяя различные методы интерполяции, можно добиться высокой точности определения временного положения некоторой характерной точки отдельного пика (например, максимума огибающей) и, соответственно, интервалов между пиками. Таким образом, поверхность «интервал—задержка» позволяет при определении периода следования реплик в анализируемом сигнале $S(t)$ совместно использовать «соседние» каналы фильтра, настроенные на близкие периодичности $T_{j-1}, T_j, T_{j+1}, \dots$. Точное определение A_X может выполняться с помощью любого двухпараметрического метода поиска локального максимума, например метода уточнения по Котельникову [3].

Заметим, что максимальной информативностью обладает поверхность, построенная с частотой дискретизации по оси абсцисс f_T , равной частоте дискретизации эхосигнала f_S : $f_T = f_S$. Если число реплик N_R велико и условие (9) не выполняется, то частота дискретизации эхосигнала f_S может быть увеличена (т. е. эхосигнал может быть интерполирован) одним из известных методов.

Совместное использование всех имеющихся в сигнале реплик (с учётом ограничения (9)) позволяет увеличить отношение сигнал/шум (поскольку, в отличие от согласованных по фазе реплик, шум складывается некогерентно), а также (за счёт уменьшения ширины W) повысить разрешающую способность и чувствительность предлагаемого метода.

3.4. Определение расстояния Q до ближайших боковых лепестков функции рассогласования

При смещении от точки A вдоль оси ординат на величину $\pm nT_{\text{интервал}}$ ($n = 1, 2, \dots$) на поверхности «интервал—задержка» будут наблюдаться боковые лепестки (см. рис. 5а), отличающиеся амплитудой от главного максимума (т. к. они представляют собой сумму меньшего количества реплик) и асимметрией относительно прямой BC (см. рис. 5б).

При смещении от точки A вдоль оси абсцисс на величину $\pm nf^{-1}$ ($n = 1, 2, \dots$) также будут наблюдаться дополнительные асимметричные боковые лепестки с меньшими амплитудами. Они образуются, когда сдвиг реплик $s(t)$ относительно друг друга (т. е. рассогласование фазы между суммируемыми репликами) составляет целое число периодов. Ближайшие к главному (справа и слева) боковые лепестки будут находиться на расстоянии (см. рис. 5в)

$$Q = 1/f. \quad (10)$$

3.5. Выбор весового окна C гребёчатого фильтра

Импульсная функция реального тракта отличается от приведённой на рис. 4 наличием затухания (т. е. уменьшения амплитуды реплик со временем) и более сложной структурой каждого

импульса, обусловленной наличием переотражений внутри приёмника. Ослабление эхосигнала во времени при построении поверхности может быть скомпенсировано изменением весового окна гребёнчатого фильтра.

Рекомендуется выбирать весовое окно гребёнчатого фильтра таким, чтобы оно, с учётом компенсации ослабления эхосигнала, представляло собой окно Ханна (приподнятый косинус). Такой подход приводит к некоторому «расширению» каждого лепестка вблизи максимума (увеличение ширины W), но ослабляет их удалённые от максимума участки (ср. рис. 5в и д).

4. АНАЛИЗ СУММЫ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Ввиду линейности операции (5) поверхность «интервал—задержка» суммы двух периодических последовательностей представляет собой сумму значений поверхностей «интервал—задержка», полученных для каждой из последовательностей отдельно. Численное моделирование показало, что независимое определение интервалов для двух равных по амплитуде периодических последовательностей возможно с точностью примерно до $0,1W$ (при выравнивании эхосигнала и использовании единичного весового окна гребёнчатого фильтра), если интервал второй периодической последовательности T_2 находится не ближе, чем W от любого из лепестков (главного и боковых) первой периодической последовательности, т. е.

$$T_2 \notin (T_1 + nQ - W, T_1 + nQ + W), \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (11)$$

Если условие (11) не выполняется, следует провести повторные измерения с другой центральной частотой зондирующего сигнала.

Ниже иллюстрируется разрешающая способность предлагаемого метода. Сигнал, представленный на рис. 6а (сумма двух периодических последовательностей импульсов, представленных

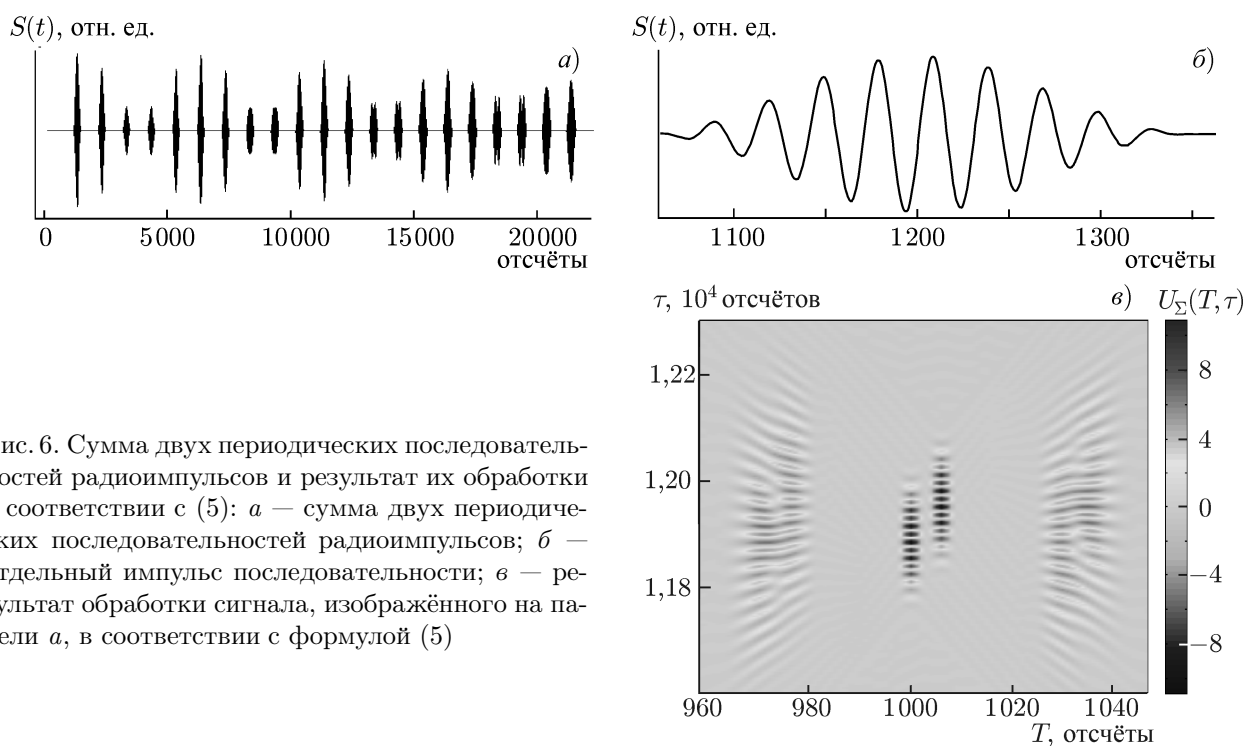


Рис. 6. Сумма двух периодических последовательностей радиоимпульсов и результат их обработки в соответствии с (5): а — сумма двух периодических последовательностей радиоимпульсов; б — отдельный импульс последовательности; в — результат обработки сигнала, изображённого на панели а, в соответствии с формулой (5)

на рис. 6б), обрабатывался в соответствии с формулой (5). Число реплик $N_R = 21$, период (10) следования максимумов $Q = 30$ отсчётов, интервалы периодичности каждой из последовательностей 1000 и 1006 отсчётов, ширина главного лепестка $W \approx 6$ (см. формулу (8)). Из рис. 6б видно, что отдельный анализ каждой из мод, например определение интервала периодичности, не представляет сложности.

5. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

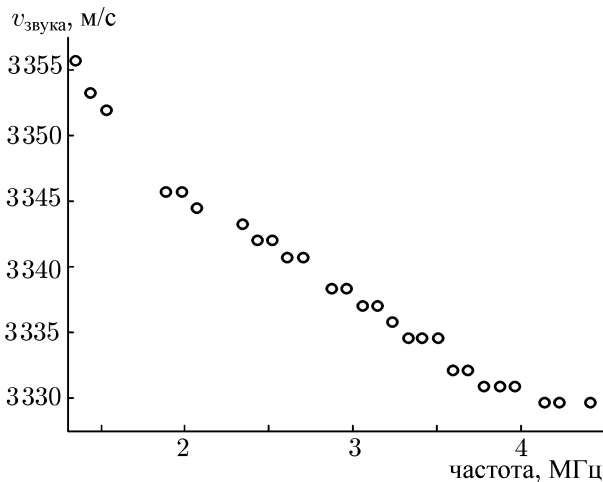


Рис. 7. Дисперсия групповой скорости поперечной волны в стальной пластине

Применение данного метода в измерителе напряжений ИН5101 [4] позволило обнаружить дисперсию акустического сигнала в пределах $0 \div 0,5 \%$ в металлической заготовке с толщиной 15 мм в диапазоне частот $2 \div 6$ МГц путём последовательного зондирования её набором узкополосных сигналов (см. рис. 7). Следующая версия данного прибора ИН5102, описанная в [5] и также базирующаяся на данном методе, для $N_R = 20$ показала чувствительность при определении задержек распространения порядка 0,01 нс (т.е. примерно $9 \cdot 10^{-5} \%$). Данный прибор также позволял отслеживать постепенное изменение скорости звука в металлической заготовке, нагреваемой лампой накаливания с мощностью 60 Вт, расположенной на расстоянии 40 см.

Ниже описывается пример применения метода для обработки экосигнала, содержащего две периодические последовательности импульсов (две моды). В среду (металлическую заготовку с коэффициентом акустической анизотропии, примерно равным 7 %) был введён зондирующий сигнал, представляющий собой прямоугольный импульс с длительностью 144 нс и принят экосиг-

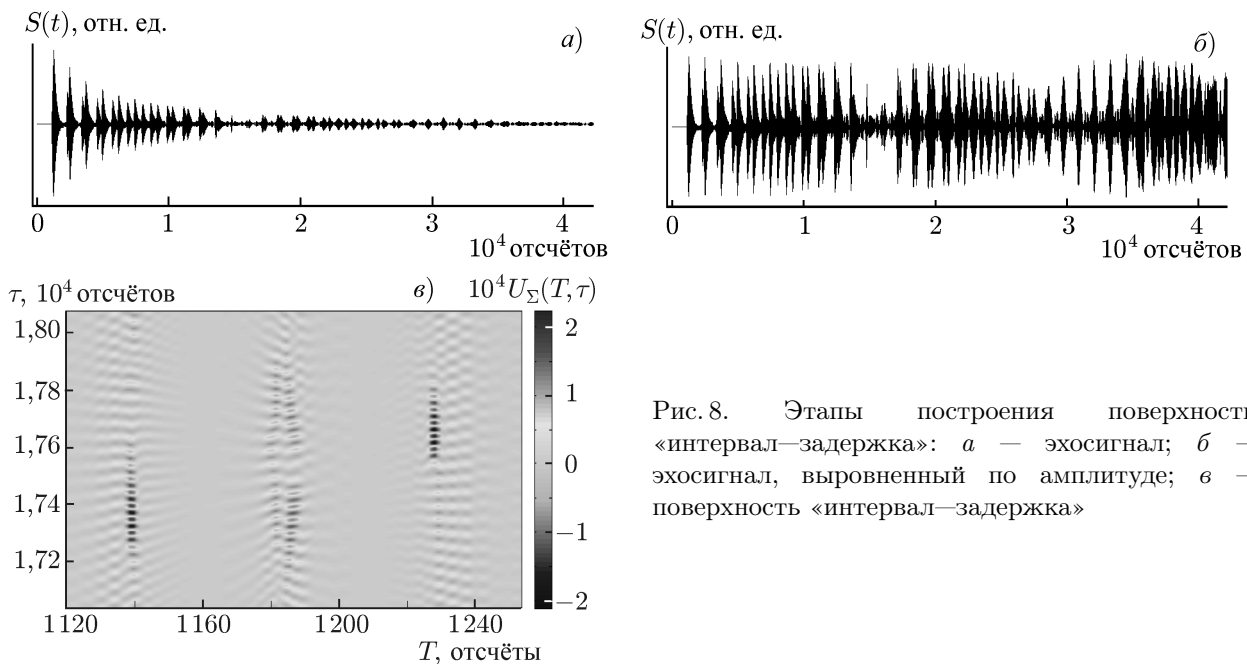


Рис. 8. Этапы построения поверхности «интервал–задержка»: а — экосигнал; б — экосигнал, выровненный по амплитуде; в — поверхность «интервал–задержка»

нал (см. рис. 8а). На нём вдоль оси абсцисс отложены номера временных отсчётов, следующих с частотой 180 МГц, а вдоль оси ординат — значения эхосигнала после аналого-цифрового преобразования. На рис. 8а хорошо различимы две периодические последовательности откликов, соответствующие двум поляризациям сдвиговых волн и имеющие различный интервал повторения, приблизительно равный 1135 и 1230 отсчётам. Сигналы с выхода многоканального фильтра $U_{\Sigma}(T, \tau)$, полученные в соответствии с формулой (5) и представленные в виде поверхности «интервал—задержка», изображены на рис. 8б.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение многоканальной согласованной фильтрации позволило обеспечить высокую точность измерения временных задержек распространения в материале эхосигналов, сформированных объёмными ультразвуковыми волнами с тремя ортогональными поляризациями. Построенные поверхности «интервал—задержка» демонстрируют хорошую визуализацию мод, что подтверждает возможность адекватной оценки полученных результатов.

Описанный метод защищён патентом [6] и положен в основу обработки сигналов, используемой в приборе для измерения механических напряжений ИН5102, разработка документации для серийного производства которого завершается на предприятии ООО «ИНКОТЕС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: Тадам, 2005. 208 с.
2. Васин В. А., Власов И. Б., Егоров Ю. М. и др. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 768 с.
3. Мартынюк М. В., Наумов С. С. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Сер. «Радиофизика». 2004. Вып. 2. С. 211.
4. Свидетельство об утверждении типа средств измерений № RU.C.28.011.A № 41227. Прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород. Рег. № 29028-10.
5. Букварёв Е. А., Мартынюк М. В. // Тр. Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева. 2011. № 2 (87). С. 26.
6. Пат. 2480740 РФ, МПК G 01 N 29/00. Способ измерения задержек распространения ультразвуковых волн в анизотропных средах и устройство для его осуществления / Е. А. Букварёв, М. В. Мартынюк, Л. А. Пасманик, В. А. Смирнов; заявитель и патентообладатель ООО «ИНКОТЕС». № 2011148170/28; Заявл. 25.11.2011; Оpubл. 27.04.2013. Бюл. № 12. 8 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2014 г.; принята в печать 21 апреля 2014 г.

PULSE RECURRENCE INTERVAL IN THE SEQUENCE IN THE ACOUSTIC TENSOMETRY DEFINITION

E. A. Bukvarev, M. V. Martynyuk, L. A. Pasmanik, and V. A. Smirnov

We consider a technique for determining the ultrasonic wave propagation delay by using multichannel matched filtering measurements of mechanical stress. The expediency of using an “interval—delay” surface as a graphic representation of the results has been substantiated. The experimental results are reported.