

УДК 519.688; 534.6.08; 534.8

Е.А. Букварёв, М.В. Мартынюк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ЭХОСИГНАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается решение проблемы надёжной качественной оценки временного положения отдельных реплик в эхосигнале полученном из акустического тракта в присутствии ревербераций.

Ключевые слова: ультразвуковое зондирование, ревербирующая среда, акустическая анизотропия.

Введение

В настоящее время достаточно широко применяются методы неразрушающего контроля с использованием акустического зондирования исследуемой среды (акустические уровнемеры, толщиномеры, измерители механических напряжений). Обычно информативным параметром, извлекаемым из принятого сигнала (эхосигнала), является время распространения. По времени распространения, при известном распределении скоростей в среде, можно определить толщину материала или уровень жидкости. Методы акустической тензометрии позволяют на основании изменения времени распространения для ненапряжённого и напряжённого состояний материала определить величину внутреннего механического напряжения.

Практически всегда исследуемый акустический тракт является ревербирующим. При наличии в исследуемой среде только одного акустического тракта (такой средой является, например, стенка трубы, выполненная из слабоанизотропной стали) интервал между импульсами (репликами) определяется временем прохождения сигналом пути: излучатель – граница раздела сред – приёмник, и последовательность импульсов в эхосигнале для подобного тракта является периодической. Наличие множества реплик (откликов, отражений) повышает информативность принятого из среды сигнала, но затрудняет его автоматическую обработку.

Проблема повышения надёжности подобных автоматизированных систем является достаточно актуальной и особенно важна в случаях, когда время работы оператора должно быть максимально сокращено, например, при контроле защитных оболочек реакторных отделений АЭС, когда оператор вынужден находиться в зоне повышенной радиационной опасности.

Рассматриваемый метод позволяет повысить надёжность определения интервала повторения реплик в ревербирующем тракте и уменьшить количество необходимой априорной информации.

Постановка задачи

Пусть производится зондирование по схеме (рис. 1), содержащей цепи согласованной обработки эхосигнала. Сигнал на выходе согласованного фильтра (СФ-эхосигнал) представляет собой периодическую последовательность сжатых импульсов с высокочастотным заполнением в случае отсутствия акустической анизотропии (рис. 3, а) либо сумму периодических последовательностей, отличающихся энергией и периодами повторения. Периоды повторения отличаются не более, чем на 15%, при соответствующей акустической анизотропии. Требуется определить период следования импульсов в последовательности с макси-

мальной энергией и положение первого импульса в этой последовательности. Метод определения должен обеспечивать автоматизированную обработку при отношении сигнал/помеха не хуже 20 дБ, количестве реплик не менее пяти.



Рис. 1. Этапы предварительной обработки эхосигнала

Определение интервала

Определение интервала предлагается построить по схеме, показанной на рис. 2. На первой стадии производится амплитудное детектирование с помощью устройства взятия модуля, последовательно соединённого с фильтром низкой частоты ФНЧ-1. Частотная характеристика последнего выбирается с учётом подавления частоты заполнения входных импульсов не менее 40 дБ. ФНЧ-2 обеспечивает дополнительную фильтрацию огибающей с целью её последующего выравнивания. Выравнивание огибающей обеспечивает узел деления А/В (блок 7), на вход которого поступает огибающая СФ-эхосигнала после нелинейного преобразования в блоке 6, выполняющего подавление сигнала меньшего заданного порога.

Затем вычисляется модуль спектра сигнала, и вся дальнейшая обработка производится в спектральной области. Спектральная оценка относится к категории интегральных и обладает преимуществом при оценке периодических сигналов в условиях флуктуаций и шумов. Во многом это вызвано уменьшенным влиянием на результат поведения сигнала во временной области в окрестностях точки. Иными словами, локальные особенности сигнала (несколько локальных максимумов на одном пике, модуляции амплитуды реплик), затрудняющие анализ эхосигнала во временной области, слабо влияют на спектр эхосигнала.

Известно, что спектр периодической последовательности импульсов является линейчатым. Положение (частота) первой гармоники в линейчатом спектре импульсной последовательности определяется периодом (интервалом) повторения импульсов, поэтому можно оценивать интервал повторения реплик на основании положения первой гармоники в спектре ВО СФ-эхосигнала, однако прямому использованию данного метода препятствуют следующие факторы:

- наличие постоянной составляющей и высокий уровень помехи в спектре вблизи неё;
- неполное выравнивание огибающей;
- наличие 2-й периодической последовательности в случае акустической анизотропии.



Рис. 2. Этапы дополнительной обработки СФ-эхосигнала

Фактор наличия постоянной составляющей решается отбрасыванием низкочастотной монотонно убывающей (с нулевой частоты) области абсолютного спектра ВО СФ-эхосигнала.

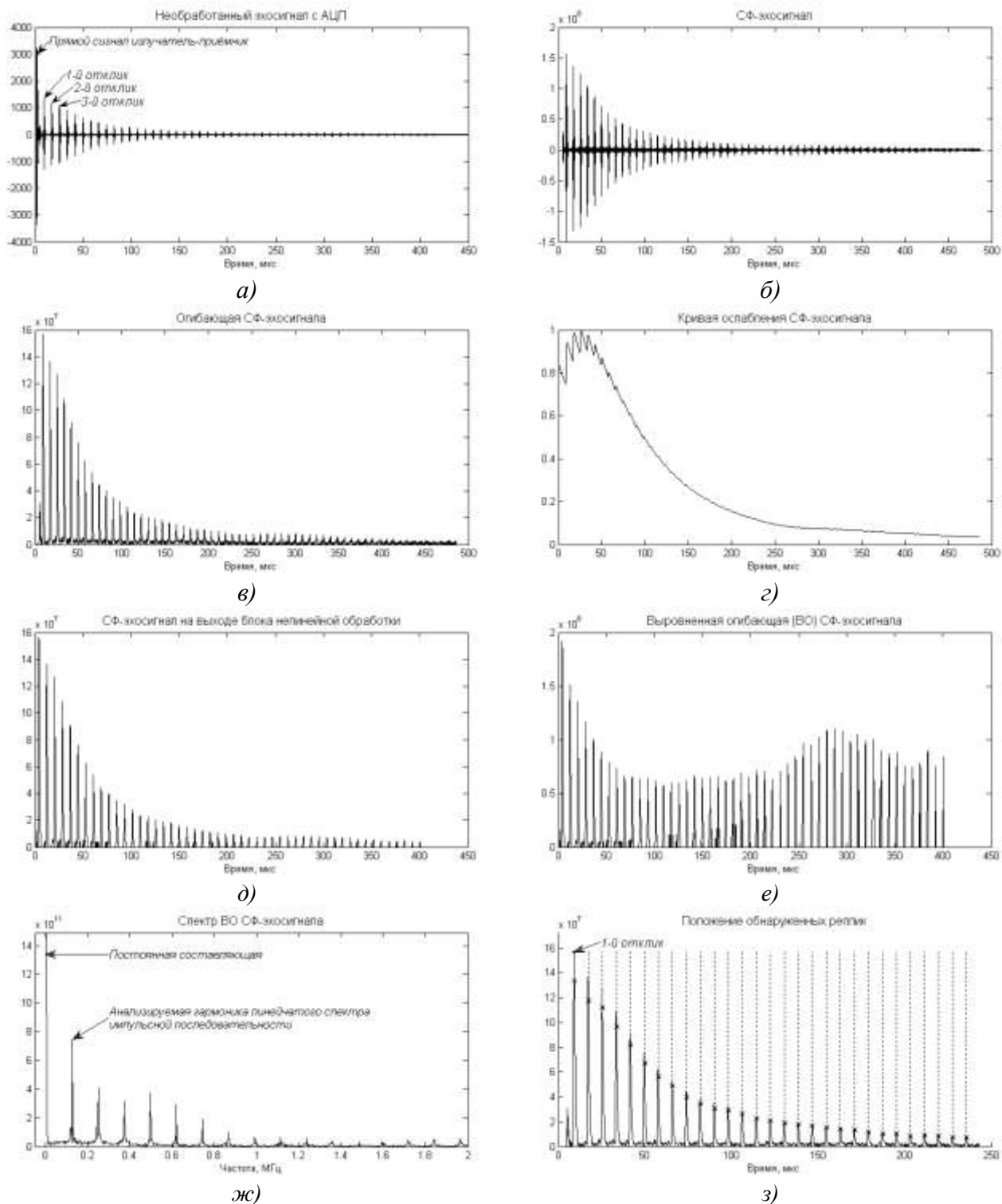


Рис. 3. Этапы обработки эхосигнала при отсутствии акустической анизотропии:
a – необработанный сигнал с выхода АЦП (сигнал на входе блока 1, рис. 1); *б* – эхосигнал после согласованной фильтрации и отбрасывания прямого сигнала (сигнал на выходе блока 2, рис. 1); *в* – огибающая СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 4, рис. 2); *г* – кривая ослабления СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 5, рис. 2); *д* – сигнал на выходе блока нелинейной обработки (блока 6, рис. 2); *е* – выровненная огибающая СФ-эхосигнала (выход блока 7, рис. 2); *ж* – спектр ВО СФ-эхосигнала (выход блока 9, рис. 2); *з* – положение обнаруженных в огибающей СФ-эхосигнала реплик

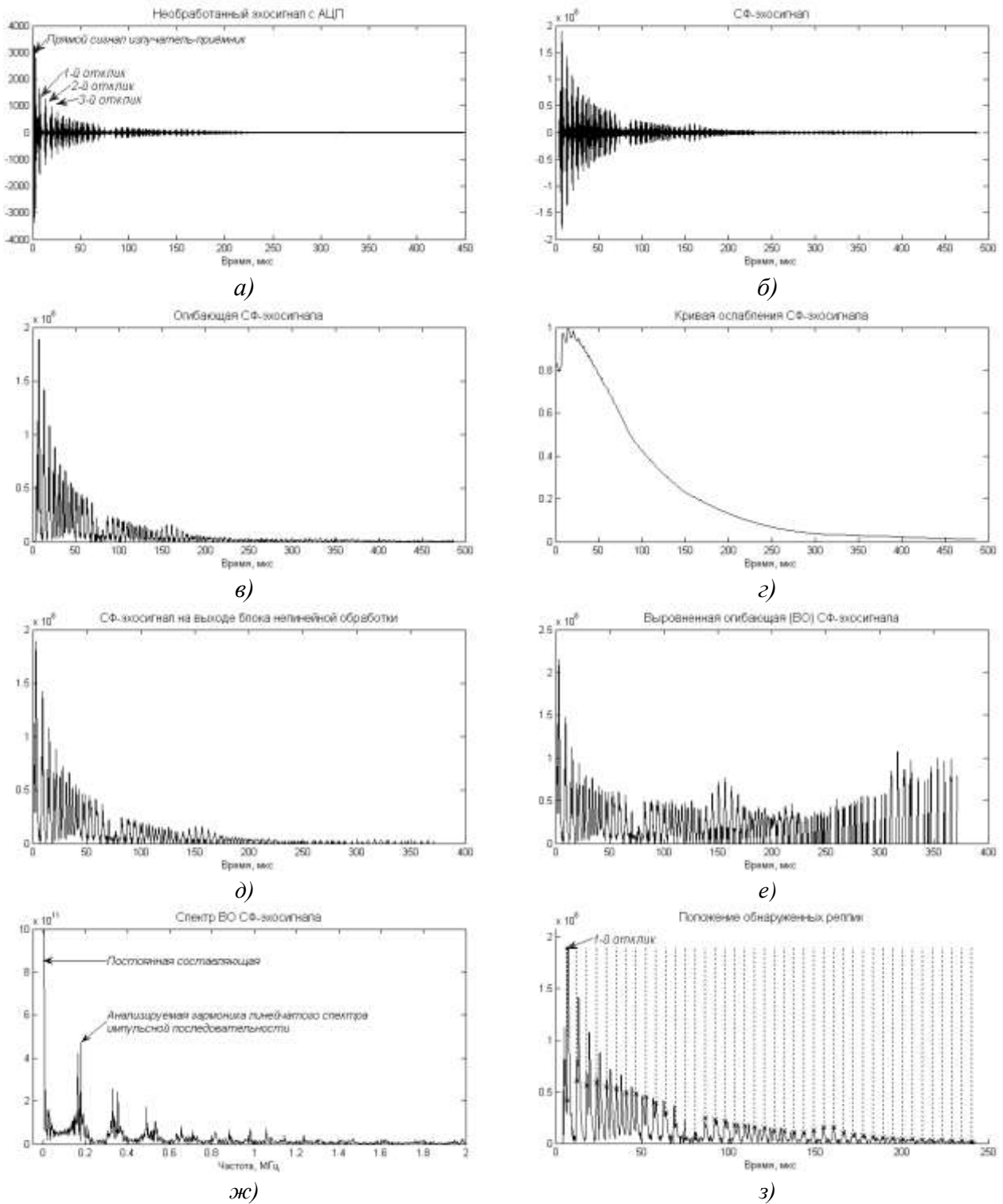


Рис. 4. Этапы обработки эхосигнала при наличии акустической анизотропии:

a – необработанный сигнал с выхода АЦП (сигнал на входе блока 1, рис. 1); *б* – эхосигнал после согласованной фильтрации и отбрасывания прямого сигнала (сигнал на выходе блока 2, рис. 1); *в* – огибающая СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 4, рис. 2); *г* – кривая ослабления СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 5, рис. 2); *д* – сигнал на выходе блока нелинейной обработки (выход блока 6, рис. 2); *е* – выровненная огибающая СФ-эхосигнала (выход блока 7, рис. 2); *ж* – спектр ВО СФ-эхосигнала (выход блока 9, рис. 2); *з* – положение обнаруженных в огибающей СФ-эхосигнала реплик

Неполное выравнивание огибающей приводит к искажению формы и фазы линейчатого спектра в окрестностях каждой из гармоник, что увеличивает взаимное влияние гармоник

друг на друга и приводит к ошибке определения положения максимума первой гармоники. Поэтому желательно обеспечить максимальное расстояние между гармониками, что достигается включением в область анализа максимально возможного количества реплик (не менее пяти).

Похожим образом влияет на результат наличие акустической анизотропии. В этом случае необходимо максимально обузить гармонику в спектральной области. Для этого необходимо выполнить предварительную оценку интервала повторения реплик на основании положения 1-й гармоники абсолютного спектра ВО СФ-эхосигнала, затем выбрать область анализа выровненной огибающей ВО СФ-эхосигнала кратной данной оценке интервала и выполнить повторную обработку блоками $8 \div 9$ (рис. 2).

Определение положения первого импульса

Предлагается также использовать информацию о фазе первой гармоники линейчатого спектра [1] ВО СФ-эхосигнала для оценки положения первой реплики эхосигнала. Поскольку на данном этапе уже известна приближённая оценка периода следования импульсов (T), повторное вычисление БПФ ВО СФ-эхосигнала выполняется на интервале, кратном периоду следования импульсов: от T до $(n + 1) \cdot T$, где $n = 3, 4, 5, \dots$ – число анализируемых импульсов. Интегрирование необходимо начинать с момента T для устранения прямого сигнала излучатель-приёмник.

Рассмотрим спектральную плотность одиночного импульса $S(t)$ на интервале от $-0.5 \cdot T$ до $+0.5 \cdot T$. Обозначим фазу спектральной плотности одиночного импульса на частоте $f_0 = T^{-1}$ как φ_0 . Требование равенства $\varphi_0 = 0$ будет соблюдаться при соблюдении следующего условия:

$$\int_{-0.5 \cdot T}^0 S(t) dt = \int_0^{0.5 \cdot T} S(t) dt.$$

Например, если одиночный импульс симметричен относительно максимума φ_0 будет равно нулю, если максимум расположен в точке $t = 0$. Далее, положением импульса на временной оси будем называть момент времени t_s , делящий импульс на две равные по площади части.

Огибающая спектра периодической последовательности импульсов

$$\dots + S(t - 2T) + S(t - T) + S(t) + S(t + T) + S(t + 2T) + \dots$$

отличается от спектра одиночного импульса только масштабом (вдоль оси ординат), т.е. фаза первой гармоники на частоте f_0 линейчатого спектра периодической последовательности импульсов будет совпадать с фазой спектральной плотности одиночного импульса на частоте f_0 .

Сдвиг сигнала во времени на t_0 приводит к изменению фазовой характеристики спектра на величину $2\pi \cdot f_0 \cdot t_0$.

Следовательно, положение n -го импульса на временной оси будет связано с фазой φ_0 первой гармоники линейчатого спектра следующим элементарным соотношением:

$$t_s = \frac{(\varphi_0 + n)T}{2\pi},$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Большинство реализаций быстрого преобразования Фурье (БПФ) (в том, числе и библиотека FFTW [2], используемая в Matlab) производят интегрирование на интервале от 0 до t , а не на интервале от $-0.5 \cdot t$ до $+0.5 \cdot t$, т.е. анализируется сигнал

$$S(t) + S(t + T) + S(t + 2T) + \dots + S(t + (N - 1) \cdot T).$$

Поэтому приведённая формула останется справедливой только при соблюдении следующих условий: если сигнал представляет собой периодическую последовательность из N импульсов, то длительность сигнала, поступающего на вход БПФ, должна быть строго кратна T . Желательно также, чтобы интервал анализа не превышал $N \cdot T$: – в этом случае все гармоники линейчатого спектра будут иметь минимальную ширину и максимальную энергию в частотной области.

Экспериментальная проверка метода

Метод был опробован при определении времени распространения в семи стальных заготовках различной толщины ($11 \div 75$ мм), имеющих различную акустическую анизотропию. Проверка проводилась для продольных и сдвиговых волн. Метод показал устойчивую работу даже при малом количестве откликов (рис. 5).

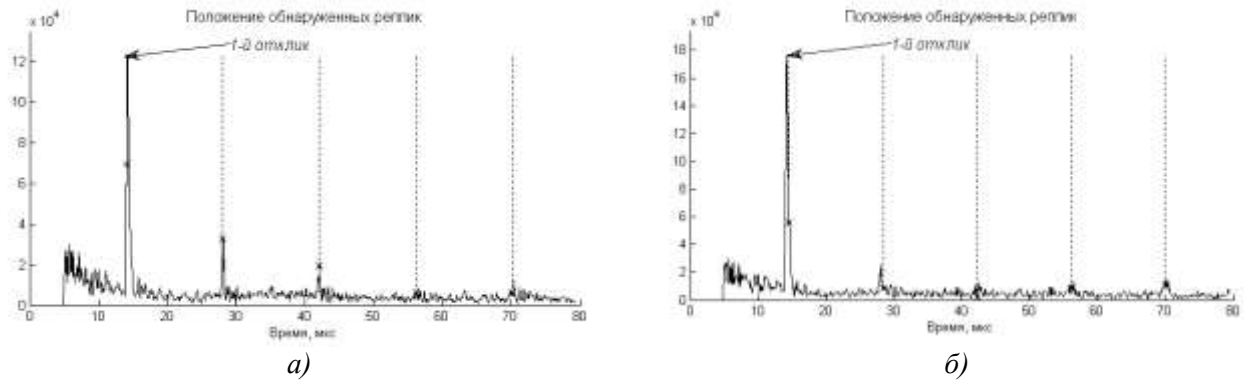


Рис. 5. Результаты обработки эхосигнала, полученного при зондировании стальной заготовки толщиной 75 мм, при сильном поглощении в тракте

Выводы

Предложен метод автоматического определения периода следования импульсов в периодической последовательности и положение первого импульса в этой последовательности. Применяя различные методы интерполяции, можно добиться высокой точности определения временного положения некоторой характерной точки отдельного пика (например, максимума огибающей) и, соответственно, интервалов между пиками. Однако для этого необходимо с достаточной степенью надёжности определить положение самих пиков.

Предлагаемый метод может быть использован в качестве вспомогательного для предварительной приближённой оценки положения хорошо локализованных (коротких) импульсов периодической последовательности на временной оси с последующим уточнением положения (например, максимума) с помощью различных методов интерполяции. Для слабо локализованных (длинных) импульсов (например, являющихся откликами узкополосного тракта) данный метод может использоваться в качестве основного.

Библиографический список

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. [Электронный ресурс] // www.fftw.org

Дата поступления
в редакцию 28.04.2011

Е.А. Bukvarev, M.V Martinuk,

USING PROPERTIES OF THE LINE SPECTRUM OF THE REPETITION PULSE TRAIN FOR AUTOMATIC ECHO SIGNALS PROCESSING

This article deal with solving of the problem robust and qualitative definition temporary situation of the separate replicas in echo signal received from acoustic tract under reverberations.

Key words: ultrasonic sounding, reverberating medium, acoustic anisotropy.