

Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи

Бархатов В.А.

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований решений одномерной обратной акустической задачи для типовых ультразвуковых преобразователей. Предлагается новый способ синтеза обратного фильтра, обладающего наиболее коротким откликом в сочетании с наилучшим подавлением шумов.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, обратная задача, эхосигнал, функция отклика точечного источника, обратный фильтр.

В настоящее время имеется большой интерес к обратным задачам в различных методах неразрушающего контроля, что обусловлено перспективой получения более подробной информации о дефектах, улучшению разрешающей способности аппаратуры, возможностью более точной локализации несплошностей.

Ранее, в работе [1], рассматривались модели формирования эхосигналов для ультразвукового эхометода, которые позволяют достаточно строго сформулировать обратную задачу. В работе [2] опубликовано теоретическое решение обратной задачи для ультразвукового метода, где выполнено численное моделирование. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального апробирования решений обратной задачи.

Рассмотрим кратко постановку прямой и обратной задач в одномерном случае, Рис.1. В модели используется два понятия. Функция отклика точечного источника (ФОТИ) - $f(l)$. Это, в сущности, эхосигнал от отражателя малых размеров. И функция распределения отражателей по дальности (ФРОД) - $\rho(l)$, зависимость коэффициента отражения от расстояния.

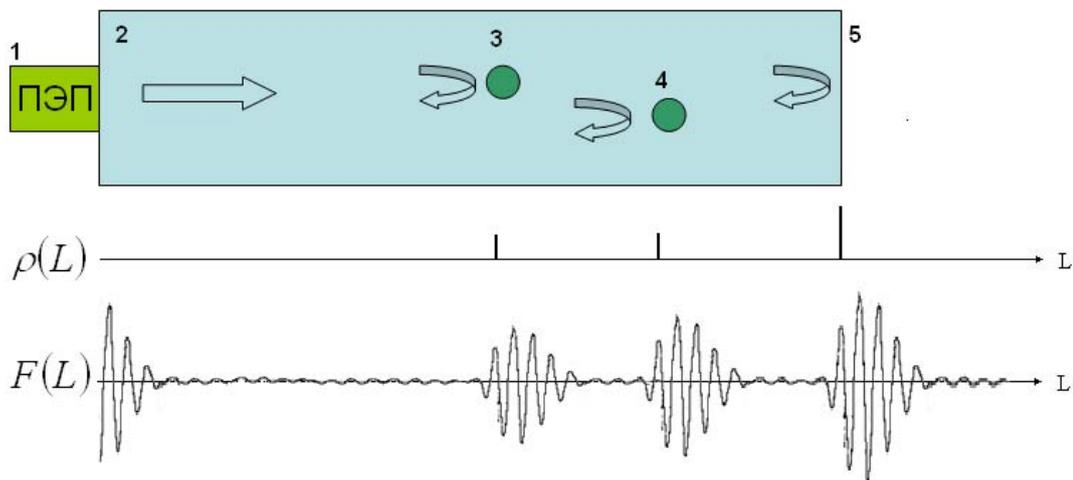


Рис.1. Принцип формирования эхосигналов, А-сканов.

1 - ультразвуковой преобразователь, 2 – изделие,
3,4 – несплошности, 5 – донная поверхность.

Общий набор эхосигналов в ультразвуковом дефектоскопе $F(L)$ формируется путем сложения ФОТИ со сдвигом, характеризующим глубину залегания отражателя. Причем амплитуда сигнала пропорциональна суммарному коэффициенту отражения на данной глубине (ФРОД). В результате выражение для эхосигналов, представляет собой интеграл свертки.

$$F(L) = \int_l f(L-l)\rho(l)dl. \quad (1)$$

Здесь, вместо времени t в качестве аргумента функций указано расстояние L . Время задержки сигнала и расстояние до отражателя связаны между собой через скорость звука.

В работе [2] показано, что операция восстановления $\rho(l)$, обратная задача, также представляет собой интеграл свертки

$$\rho(l) = \int_l h(l-L)F(L)dl \quad (2)$$

$h(l)$ - функция обратного преобразования.

В прикладной математике преобразования посредством интеграла свертки называют фильтрацией. В нашем случае имеется фильтр с импульсной характеристикой $h(l)$, который преобразует входной сигнал $F(L)$ в ФРОД $\rho(l)$. Для краткости будем употреблять термин обратный фильтр.

В работе [2] также показано, что в данной постановке решение обратной задачи существует и является единственным. Функция отклика точечного источника $f(l)$ и функция обратного преобразования $h(l)$ связаны между собой. Комплексный спектр $h(j\omega)$ является обратным по отношению к спектру $f(j\omega)$.

$$h(j\omega) = \frac{1}{f(j\omega)}. \quad (3)$$

Существуют некоторые ограничения связанные с реализуемостью обратного фильтра и качеством его работы.

В ультразвуковых приборах спектр ФОТИ $f(j\omega)$ ограничен. В основном спектр сигналов определяется полосой пропускания ультразвукового преобразователя. Спектральная плотность ФОТИ сконцентрирована в некотором диапазоне частот $\omega_n \div \omega_b$, а за пределами диапазона резко уменьшается. Попытка синтеза функции $h(j\omega)$ приведет к тому, что за пределами диапазона частот $\omega_n \div \omega_b$ ее модуль будет стремиться к бесконечности. Кроме того, физический сигнал $F(L)$ всегда содержит небольшую шумовую составляющую. Спектральные составляющие шума, выходящие за пределы частотного диапазона $\omega_n \div \omega_b$, будут несоразмерно усиливаться, что ухудшает качество восстановления ФРОД.

На практике приходится ограничивать спектральный диапазон $h(j\omega)$. Но тогда не получится идеального восстановления функции распределения отражателей $\rho(l)$. Отклик обратного фильтра на ФОТИ будет представлять собой некоторый импульс конечной длительности. Необходимо получить отклик на ФОТИ в виде наиболее короткого импульса при ограниченном диапазоне частот.

Имеет место еще одна проблема, связанная с тем, что в частотной характеристике $h(j\omega)$ появляются острые пики, которые во временной области формируют очень длинную импульсную характеристику $h(l)$. Это ухудшает качество преобразования эхосигналов и требует неоправданно больших вычислений. Практика работы с обратными фильтрами показывает, что минимальная длительность импульсной характеристики $h(l)$ должна быть на 30-50% больше длительности ФОТИ.

Итак, при синтезе обратного фильтра необходимо найти компромисс обеспечивающий формирование наиболее короткого отклика на ФОТИ в ограниченном спектре сигналов, минимальную чувствительность к шумам при минимальной длительности импульсной характеристики. Указанные требования сильно противоречивы.

В данной работе предлагается использовать поисковый алгоритм для нахождения оптимальной импульсной характеристики обратного фильтра $h(l)$. Процедура поиска должна минимизировать целевую функцию

$$\Psi = \sum_i (Ds_i - R_i)^2 + \sum_i Ns_i^2 \Rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь и далее все сигналы указаны в дискретной форме. Для синтеза фильтра используются следующие исходные данные:

R_i - желаемый отклик фильтра на ФОТИ, выбирается пользователем,

f_i - сигнал ФОТИ, полученный экспериментально при прозвучивании отражателя с близкими характеристиками,

N_i - сигнал шума, может использоваться случайный сигнал или естественный шум приемника ультразвукового дефектоскопа.

В результате поиска находится импульсная характеристика обратного фильтра h_i соответствующая минимуму целевой функции.

В целевой функции (4) анализируется сигнал отклика фильтра на ФОТИ

$$Ds_i = \sum_k f_{i-k} h_k \quad (5)$$

и сигнал отклика фильтра на шум

$$Ns_i = \sum_k N_{i-k} h_k \quad (6)$$

Целевая функция определяется как сумма квадратов отклонения реального отклика фильтра на ФОТИ от желаемого сигнала плюс сумма квадратов реакции фильтра на шум. В итоге минимум целевой функции дает наиболее близкий к желаемому отклик фильтра на ФОТИ в совокупности с наилучшим подавлением шумов. Длительность импульсной характеристики обратного фильтра определяется размером массива h_i и устанавливается заранее.

При минимизации целевой функции (4) использовался метод случайного поиска, который содержит несколько этапов:

1. Исходные данные загружаются в массивы f_i , N_i , R_i . Вначале устанавливается нулевая импульсная характеристика фильтра $h_i \equiv 0$.
2. Производится первичный расчет целевой функции.
3. К импульсной характеристике h_i добавляется небольшой шумоподобный сигнал, сформированный датчиком случайных чисел.
4. Выполняется расчет целевой функции.
5. Проверка уменьшения целевой функции. Если значение Ψ уменьшилось, принимают текущее значение h_i . В противном случае шумоподобный сигнал убирают из данных h_i .
6. Переход на шаг 3. Здесь же выполняется проверка, что при нескольких попытках изменения h_i целевая функция перестает уменьшаться. Тогда алгоритм заканчивает работу.

В экспериментальных исследованиях использовался ультразвуковой дефектоскоп УД9812 в комплексе со специализированной программой для персонального компьютера. Программа производит чтение высокочастотных А-сканов из дефектоскопа по каналу USB, имеет сервисные функции для выбора эхосигналов, содержит алгоритм синтеза обратных фильтров и производит

обработку А-сканов. Все экспериментальные сигналы, приведенные ниже, имеют частоту дискретизации 80 МГц.

Далее рассмотрим пример синтеза обратного фильтра для прямого совмещенного преобразователя MB4F, изготовитель фирма Krautkramer. Частота ультразвуковых колебаний 4МГц.

В качестве ФОТИ f_i был взят донный эхосигнал в стальном образце толщиной 30мм, Рис.2А. Сигнал шума N_i сформирован с помощью стандартной процедуры RANDOM, генератор случайных чисел, Рис.2Б. Установлена амплитуда шума 3% от амплитуды ФОТИ. Для описания желаемого отклика, Рис.2В, использовалась эмпирическая формула

$$R_i = \exp(-P \cdot i^2) \cdot \cos(J \cdot i). \quad (7)$$

Параметры P и J выбирались с таким расчетом, чтобы длительность положительного пика была равна 0,5 периода колебаний ФОТИ и весь сигнал занимал около 1,5 периодов колебаний. В этом случае получается короткий импульс с достаточно узким спектром.

Затем был выполнен поиск оптимального обратного фильтра. Отклик фильтра на ФОТИ показан на Рис.2Г. Видно, что поисковый алгоритм нашел фильтр, который дает отклик на ФОТИ близкий к желаемому, сравните Рис.2В и Рис.2Г.

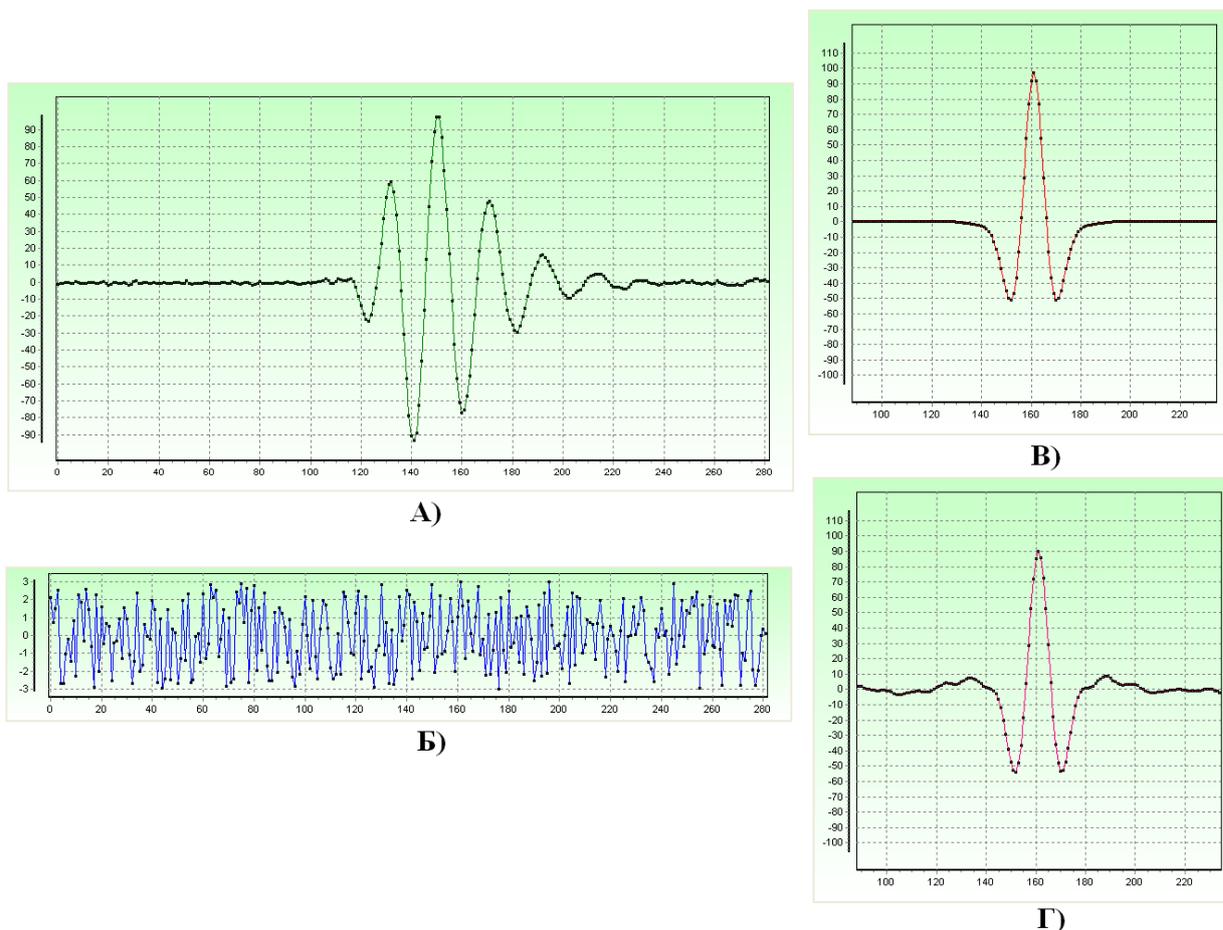


Рис.2. Вид сигналов при синтезе обратного фильтра для ультразвукового преобразователя MB4F.
 А) ФОТИ (донный эхосигнал).
 Б) Белый шум.
 В) Желаемый отклик фильтра на ФОТИ.
 Г) Отклик на ФОТИ синтезированного обратного фильтра.

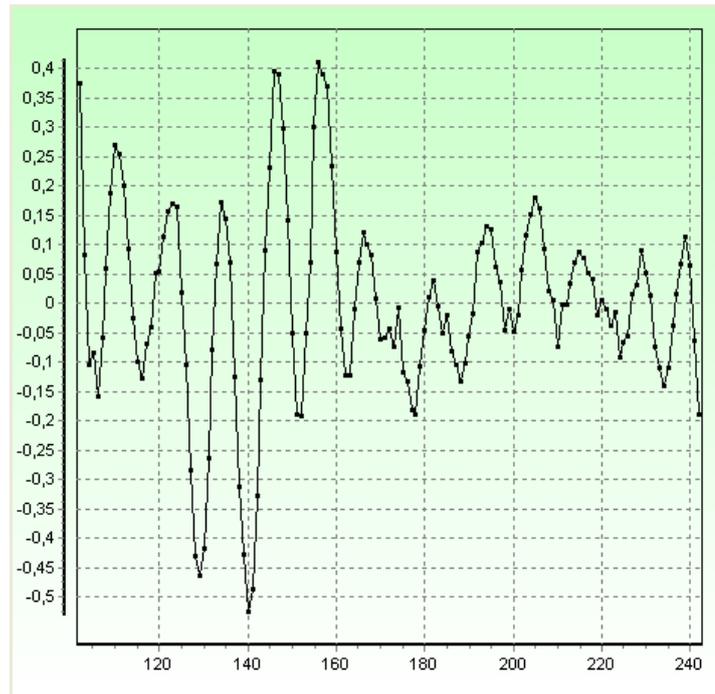


Рис.3. Импульсная характеристика обратного фильтра.

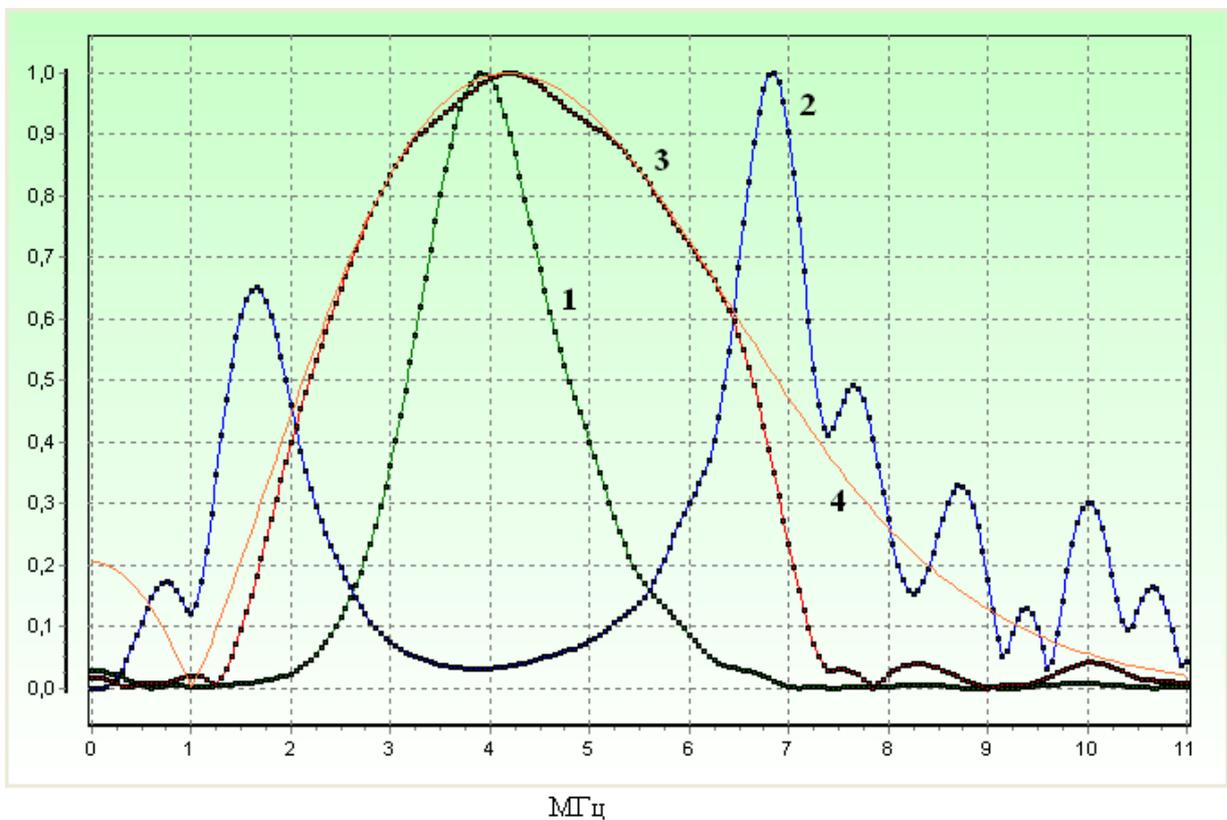


Рис.4. Нормированные спектральные характеристики сигналов.

- 1 – Спектр ФОТИ (донный эхосигнал).
- 2 – Амплитудно-частотная характеристика обратного фильтра.
- 3 – Спектр отклика на ФОТИ.
- 4 – Спектр желаемого отклика на ФОТИ.

Импульсная характеристика фильтра показана на Рис.3., она имеет довольно сложный характер. Более наглядную информацию о свойствах обратного фильтра дают частотные характеристики на Рис.4. Здесь, в диапазоне частот 1,7 – 6,8 МГц амплитудно-частотная характеристика фильтра 2 является обратной по отношению к спектру ФОТИ 1. За пределами этого диапазона коэффициент передачи обратного фильтра уменьшается. Такое поведение связано с тем, что в целевой функции поискового алгоритма заложено требование минимального отклика фильтра на шум.

Также имеет место неравномерность амплитудно-частотной характеристики 2 на частотах менее 1,7 МГц и более 6,8 МГц. Данный эффект возникает при синтезе фильтра с короткой импульсной характеристикой. Неравномерность коэффициента передачи практически не оказывает влияния на качество работы фильтра поскольку за пределами диапазона частот 1,7 – 6,8 МГц спектральная плотность ФОТИ крайне мала.

На Рис.4. показан спектр отклика фильтра на ФОТИ 3 и спектр желаемого отклика 4. Спектры достаточно близки в рабочем диапазоне частот. Сравнивая импульсные отклики на Рис.2.В и Рис.2.Г, а также спектральные характеристики 3 и 4 на Рис.4 видно, что с помощью метода случайного поиска найден действительно оптимальный обратный фильтр. Данный фильтр расширяет спектр эхосигналов примерно в три раза и на столько же сжимает эхосигналы.

Теперь проверим действие фильтра. На Рис.5. представлен эксперимент по прозвучиванию стального образца толщиной 30мм с плоскодонным отражателем $\varnothing 3,6$ мм высотой 4мм. Эхосигналы, получаемые в ультразвуковом дефектоскопе, показаны на Рис.5Б. Эхосигнал от плоскодонного отражателя 1 сливается с донным эхосигналом 2. После обработки А-скана обратным фильтром указанные эхосигналы полностью разделяются, Рис.5В.

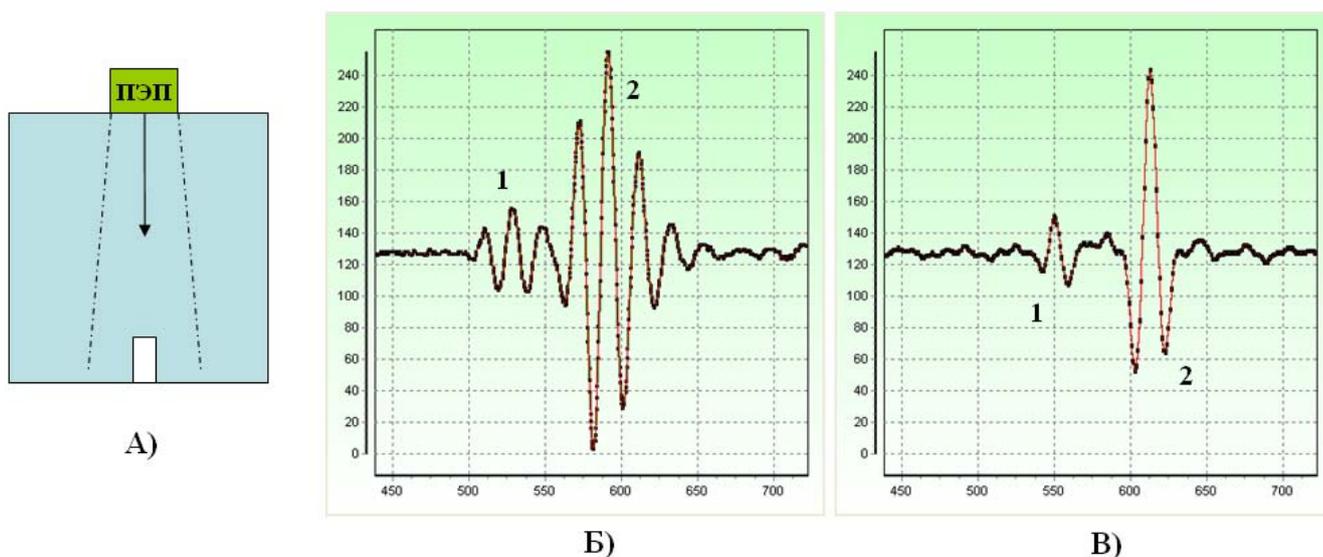


Рис.5. Улучшение лучевой разрешающей способности ультразвукового преобразователя MB4F с помощью обратной фильтрации эхосигналов.

- А) Схема прозвучивания стального образца толщиной 30мм с плоскодонным отверстием $\varnothing 3,6$ мм высотой 4мм.
 Б) Эхосигналы: 1- от плоскодонного отверстия, 2- донный эхосигнал.
 В) Эхосигналы после обработки.

Рассмотрим еще один эксперимент с использованием наклонного ультразвукового преобразователя П121-2,5-50⁰- $\varnothing 14$ (частота 2,5МГц, угол ввода 50⁰). Схемы прозвучивания и ультразвуковые сигналы показаны на Рис.6 и Рис.7.

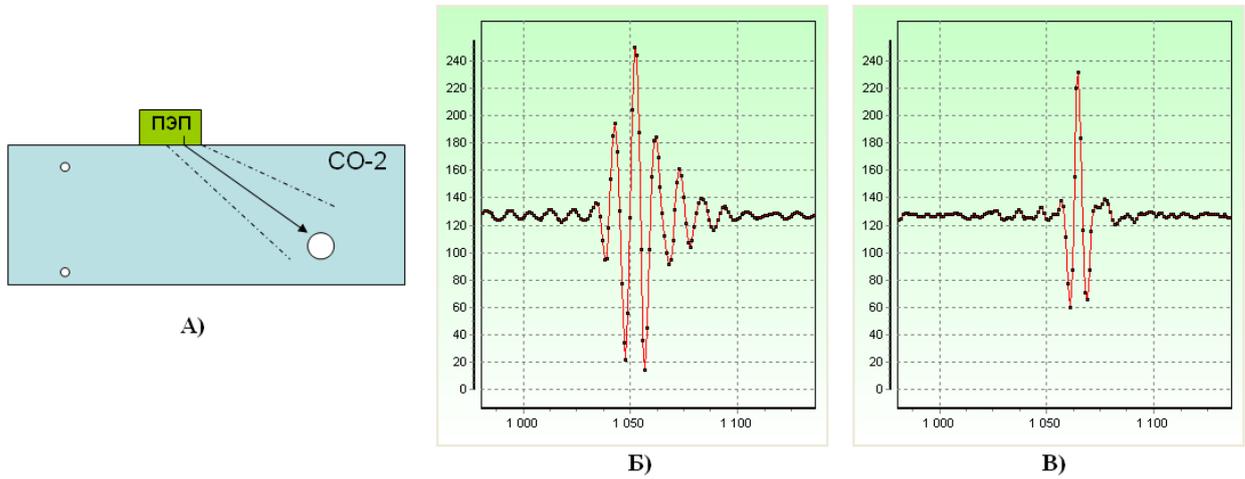


Рис.6. Синтез обратного фильтра для наклонного преобразователя П121-2,5-50⁰-Ø14.
 А) Схема прозвучивания отверстия Ø6 мм в образце СО-2.
 Б) ФОТИ - эхосигнал от отверстия Ø6 мм.
 В) Отклик обратного фильтра на ФОТИ.

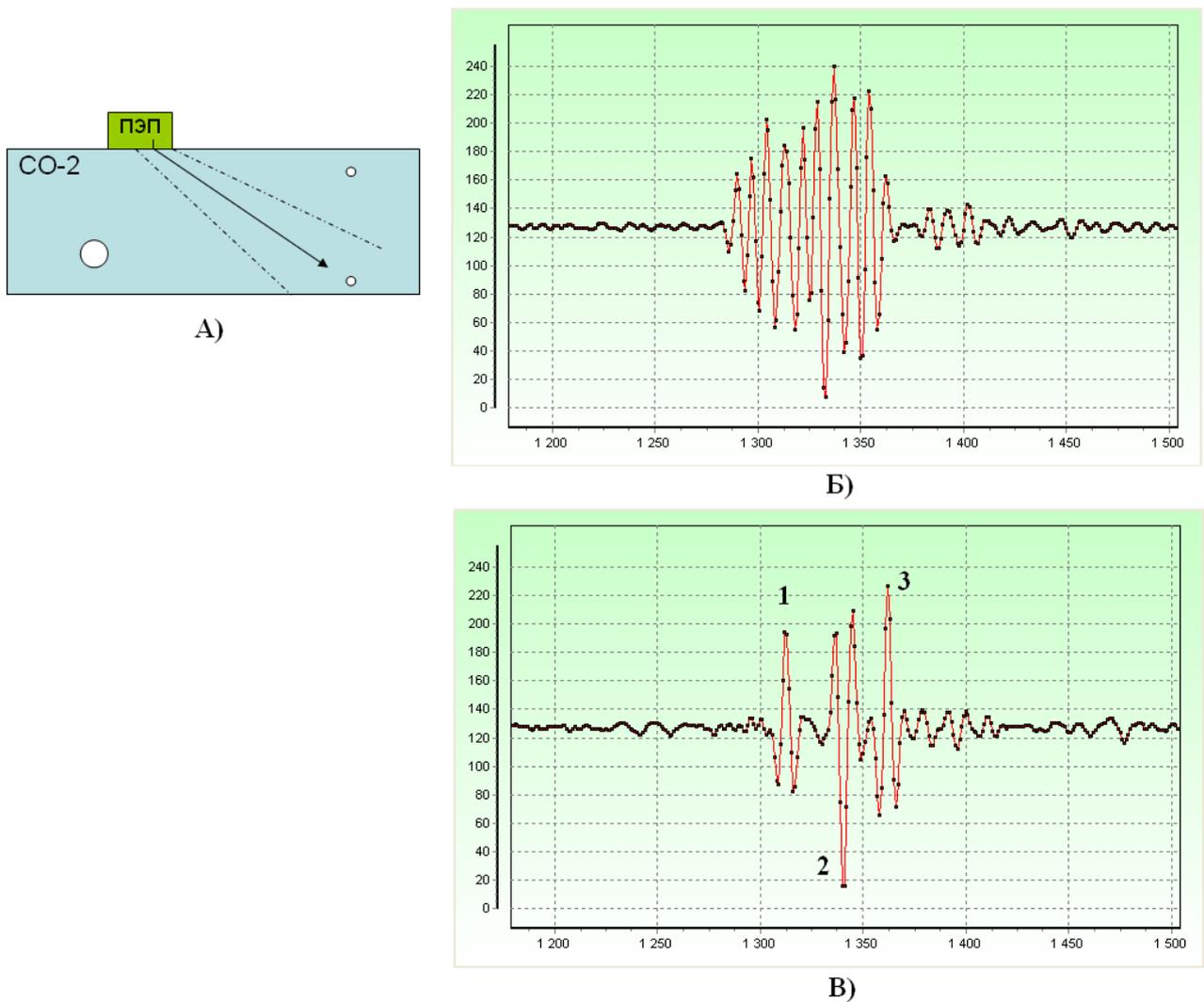


Рис.7. Разделение эхосигналов от отверстия Ø2 мм на глубине 3мм в образце СО-2.
 Ультразвуковой преобразователь П121-2,5-50⁰-Ø14.
 А) Схема прозвучивания отверстия.
 Б) Композитный эхосигнал.
 В) Эхосигналы после обратной фильтрации.

В качестве отражателя имитирующего ФОТИ использовано отверстие $\varnothing 6$ мм в образце СО-2, Рис.6.А. На первый взгляд может показаться, что отверстие не подходит для этой цели. Следует отметить, что ультразвуковой сигнал, пришедший обратно к преобразователю, формируется от небольшого сектора цилиндрической поверхности ориентированной перпендикулярно к падающим ультразвуковым лучам. Вся остальная часть цилиндра рассеивает волны в разные стороны. Фактически элементы отражающей поверхности отверстия находятся на одной и той же дальности. Поэтому эхосигнал от отверстия с достаточной для практики точностью можно принять за ФОТИ.

Эхосигнал от отверстия $\varnothing 6$ мм в СО-2 показан на Рис.6Б. С помощью поискового алгоритма был синтезирован обратный фильтр, который преобразует эхосигнал ФОТИ Рис.6Б в отклик Рис.6В. Фильтр сжимает ФОТИ в четыре раза.

Рис.7. демонстрирует эксперимент по разделению эхосигналов от отверстия $\varnothing 2$ мм на глубине 3мм в образце СО-2. Так как отверстие $\varnothing 2$ мм находится близко к донной поверхности образца, то формируются три эхосигнала.

1. Прямой отраженный эхосигнал.
2. Отражение от донной поверхности и от отверстия.
3. Эхосигнал, сформированный однажды отраженными лучами.

Указанные ультразвуковые сигналы имеет небольшую разницу по времени прихода и накладываются друг на друга, Рис.7.Б. После обработки обратным фильтром эхосигналы полностью разделяются, Рис.7.В.

Заметим, что сигнал 2 на Рис.7.В. инвертирован. Это связано с тем, что при отражении поперечных волн от донной поверхности образца происходит изменение фазы отраженной волны на 180 градусов. Все спектральные компоненты ультразвукового сигнала меняют фазу не 180 градусов, значит, во временной области происходит инверсия сигнала.

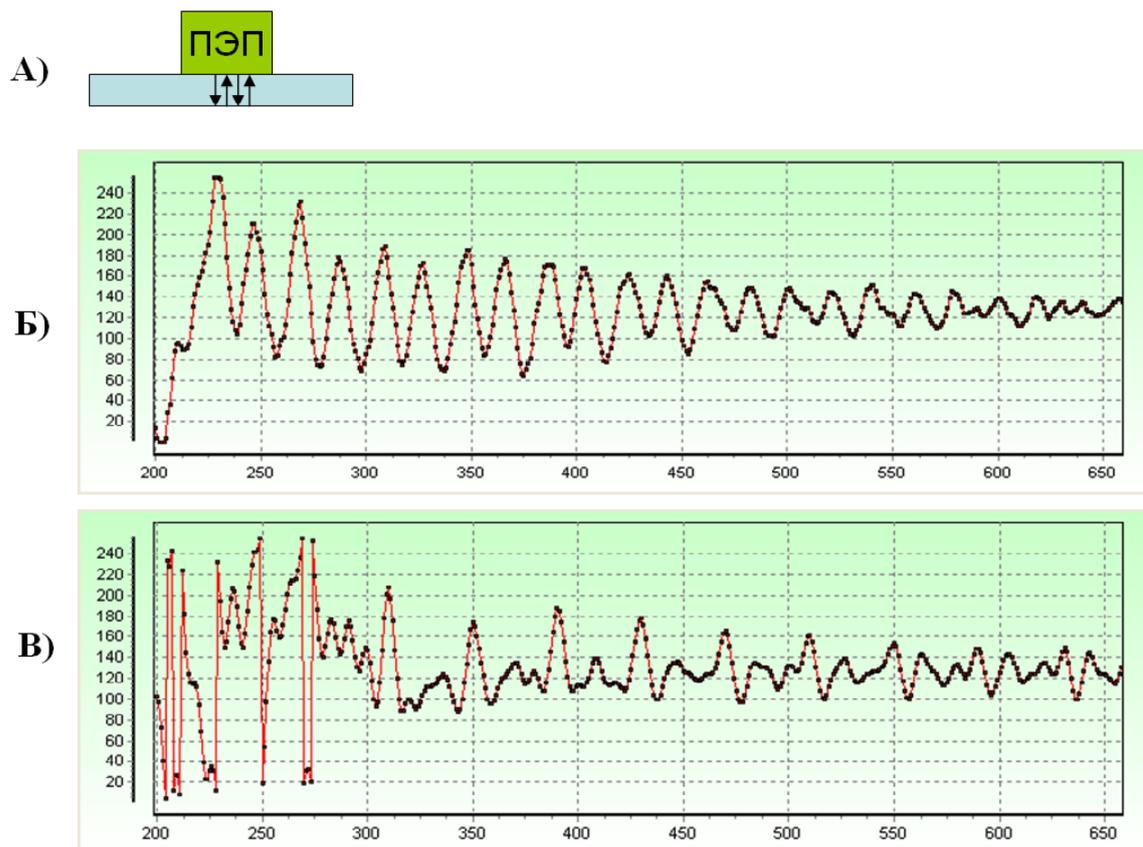


Рис.8. Серия донных эхосигналов в стальном листе толщиной 2мм.

Преобразователь П111-5,0-К8.

- А) Схема прозвучивания листа 2мм.
- Б) Исходный А-скан. Наложение донных эхосигналов.
- В) Результат обработки обратным фильтром.

В процессе формирования эхосигнала 3 на Рис.7Б. ультразвуковые волны отражаются два раза от донной поверхности. Первый раз, при излучении. Второй раз, при приеме, после отражения от отверстия. Ультразвуковой импульс инвертируется два раза, поэтому эхосигнал 3 имеет нормальную форму.

Проблема разделения эхосигналов часто возникает при контроле изделий малых размеров. Рассмотрим пример такой ситуации (Рис.8) - эксперимент с прозвучиванием стального листа толщиной 2мм с помощью прямого совмещенного преобразователя П111-5,0-К8

На Рис.8.Б. показан А-скан множества переотраженных (донных) эхосигналов в листе. Длительность отдельного эхосигнала в преобразователе П111-5,0-К8 составляет около 5-ти колебаний, поэтому сигналы сливаются и образуют практически непрерывные затухающие колебания с частотой 5МГц. В таких условиях невозможно определить толщину листа и тем более выявить дефекты.

Для разделения серии донных эхосигналов был синтезирован обратный фильтр, который производит сжатие эхоимпульсов в 5 раз. В качестве ФОТИ использован донный эхосигнал в стальном образце толщиной 8мм.

Рис.8.В. представляет А-скан, обработанный обратным фильтром. Качество восстановления ФРОД невысокое, тем не менее, хорошо видно отдельные эхоимпульсы. Здесь, искажения формы импульсов связаны со спектральными искажениями при отражении волн и с интерференцией ультразвуковых волн при многократных отражениях в листе.

Таким образом, представленные эксперименты показывают, что одномерная обратная акустическая задача может быть решена на практике. При использовании типичных ультразвуковых преобразователей их лучевая разрешающая способность может быть улучшена в 3-5 раз посредством обработки А-сканов обратным фильтром.

Обратные фильтры могут найти применение в классических ультразвуковых дефектоскопах, в приборах с визуализацией несплошностей а также в дефектоскопах с обработкой А-сканов методом синтезированной апертуры (SAFT). В указанной аппаратуре обратные фильтры улучшают разрешающую способность, повышают точность локализации дефектов или качество изображений несплошностей. Кроме того возможно применение обратных фильтров в установках для измерения скорости звука в объектах малых размеров.

Список литературы

1. Бархатов В.А. Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений. Дефектоскопия, №1, 2005, с. 10-19.
2. Бархатов В.А. Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки эхосигналов. Дефектоскопия, № 6, 2003, с.10-17.