

Адаптивный алгоритм решения одномерной обратной акустической задачи. Экспериментальное исследование

Бархатов В.А.

В статье рассматриваются способы обработки А-сканов, основанные на локальном разложении эхосигналов по набору функций отклика точечного источника. Показано, что такой подход дает решение одномерной обратной акустической задачи. Для улучшения качества решений предложен новый алгоритм адаптивной фильтрации, обеспечивающий наиболее короткий отклик в сочетании с высоким подавлением шумов. В работе представлены результаты экспериментов, демонстрирующие эффективность преобразования эхосигналов в короткие импульсы.

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

Практическое решение обратных задач в ультразвуковом неразрушающем контроле позволяет получить более подробную информацию о дефектах, улучшает разрешающую способность аппаратуры, обеспечивает более точную локализацию несплошностей.

По данной тематике автором опубликовано несколько работ. В статье [1] рассматривались модели формирования эхосигналов для ультразвукового метода, которые позволяют достаточно строго сформулировать обратную задачу. В работах [2,3] представлено теоретическое решение обратной задачи для ультразвукового метода, где рассматривается прозвучивание объемными волнами в дальней зоне ультразвукового поля преобразователя. Статья [4] посвящена практическому решению обратной задачи, где предложен способ синтеза оптимального обратного фильтра. Синтез выполняется с помощью поискового алгоритма. В настоящей работе предлагается новый вариант решения обратной задачи, основанный на локальном разложении А-скана по функциям отклика точечного источника, что позволяет получить существенно лучшие результаты.

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. Функция распределения отражателей по дальности (ФРОД) - $\rho(l)$, зависимость коэффициента отражения от расстояния.

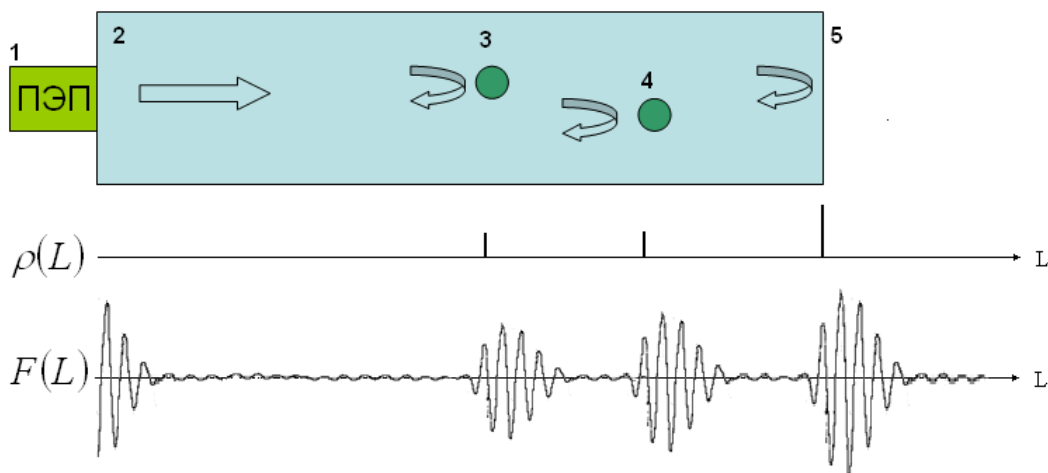


Рис.1. Принцип формирования эхосигналов на А-скане.

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, Рис.1. 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

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

где $h(l)$ - функция обратного преобразования. В статье [2] приведено доказательство существования и единственности функции $h(l)$. Также найдено соотношение между спектральными характеристиками $f(l)$ и $h(l)$

$$h(j\omega) = 1/f(j\omega). \quad (3)$$

Другими словами, спектр $h(j\omega)$ является обратным по отношению к спектру $f(j\omega)$.

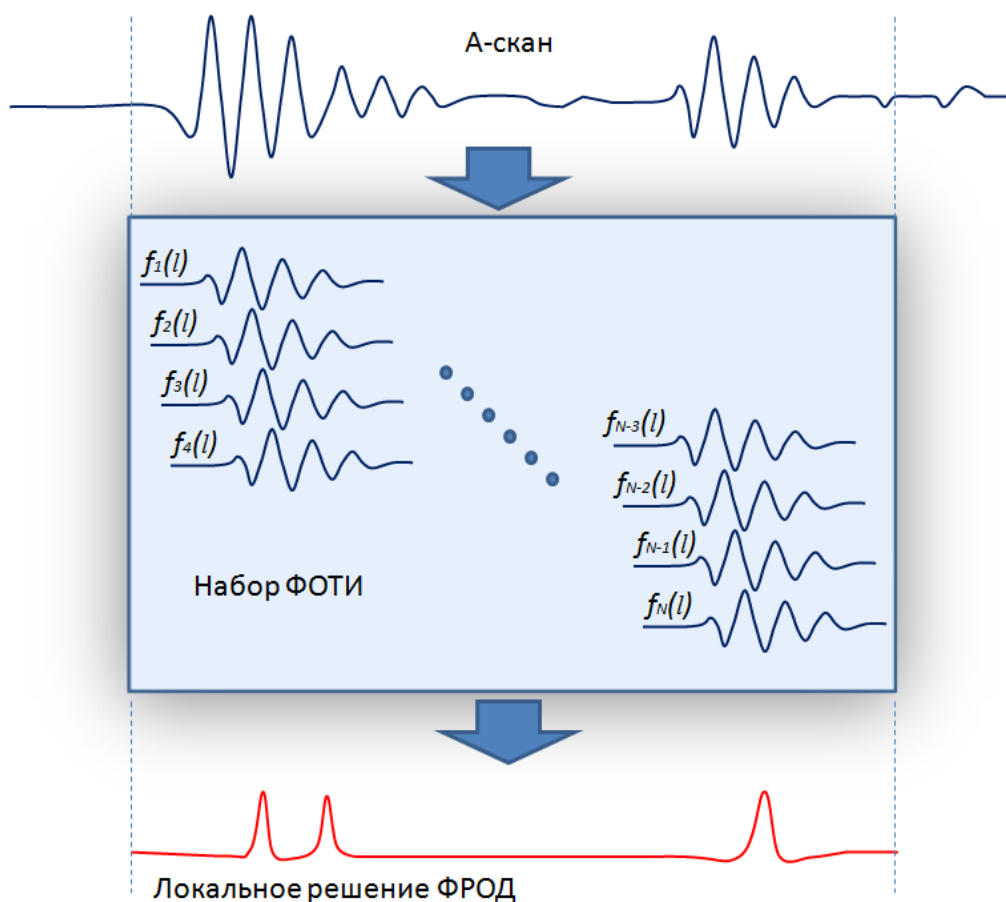


Рис.2. Разложение А-скана по ограниченному набору ФОТИ. Локальное решение обратной задачи.

На практике дело обстоит сложнее. А-скан $F(L)$, полученный в ультразвуковом дефектоскопе, содержит не только полезные эхосигналы, но и шум, наводки всевозможного происхождения, ошибки дискретизации и прочее. Формальный подход, решение по формуле (2), все сигналы считает полезными и преобразует их в соответствии с заложенной математической моделью. Такие решения крайне чувствительны к шумам и другим сигналам, не соответствующим модельным представлениям. В практических применениях необходимо как-то выделять полезные эхосигналы и исключать из решения шумы и помехи.

Рассмотрим способ локального разложения А-скана по ФОТИ, Рис.2. Сигнал ФОТИ проще всего определить экспериментально как эхосигнал от отражателя с элементами поверхности, расположенными на одинаковой дальности. Например, донный эхосигнал. Далее, установим ограниченный набор из N функций отклика точечного источника, которые имеют небольшой сдвиг на величину ΔL одна относительно другой. Обозначим их $f_i(L)$. Поставим задачу выполнить локальное разложение А-скана $F(L)$ по выбранному набору базисных функций $f_i(L)$. Такое разложение демонстрирует формула (4).

$$F(L) \approx \sum_{i=1}^N f_i(L) \rho_i \quad (4)$$

Величины ρ_i представляют собой оценки коэффициента отражения на различных дальностях в соответствии с положением функций $f_i(L)$. Коэффициенты ρ_i дают приближенное решение обратной задачи, сравните формулы (1) и (4).

В выражении (4) указан знак примерного равенства. Это связано с тем, что А-скан содержит не только полезные сигналы, но также искажения, шум, помехи, ошибки дискретизации и т.д. Такие сигналы частично не коррелируют с функциями $f_i(L)$, поэтому на практике не будет идеального разложения и восстановления А-скана по ФОТИ $f_i(L)$. С другой стороны исключение «не санкционированных сигналов» обеспечивает небольшую очистку от шумов.

Далее, необходимо найти способ вычисления решений ρ_i . В выражении (3) выполним свертку правой и левой части с функциями $f_i(L)$, получим.

$$P_i = \sum_{j=1}^N \Psi_{ij} \rho_j, \quad (5)$$

где: $P_i = \int_l f_i(l) F(l) dl$ - свертка А-скана с ФОТИ,

$\Psi_{ij} = \int_l f_i(l) f_j(l) dl$ - матрица сверток ФОТИ между собой.

Искомые коэффициенты ρ_i найдем по формуле

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N \Psi_{ij}^{-1} P_j, \quad (6)$$

где: Ψ_{ij}^{-1} - обратная матрица по отношению к Ψ_{ij} .

Таким образом, решение обратной задачи (вычисление коэффициентов отражения) выполняется в два этапа. Вначале определяют свертки А-скана с ФОТИ P_i , затем вычисляют ρ_i по формуле (6). Компоненты обратной матрицы Ψ_{ij}^{-1} определяют заранее, после того как ФОТИ найдена экспериментально.

Отметим, что исходно был использован ограниченный набор ФОТИ, поэтому в алгоритме исследуется локальный участок А-скана и получается решение обратной задачи на этом участке. Чтобы получить решение для всего А-скана, используем данный способ расчета как оконную операцию. Алгоритм несколько изменится. Будем перемещать окно по А-скану и в каждом его положении выполним вычисление коэффициентов отражения. Решение в середине окна $\rho_{N/2}$ примем в качестве результата расчета алгоритма. Обозначим эту величину как $\rho(l)$, указав в качестве параметра положение окна на А-скане. Вся обработка заключается в том, что окно перемещается по А-скану и в каждом его положении определяется решение обратной задачи.

Такой способ расчета эквивалентен преобразованию с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой. Действительно можно записать

$$\rho(l) = \int_l h(l-L)F(L)dl, \quad (7)$$

$$h(l) = \sum_{j=1}^N \Psi_{\frac{N}{2},j}^{-1} \cdot f_j(l) \quad (8)$$

Видно, что обратный фильтр $h(l)$ построен на основе функций отклика точечного источника, сдвинутых относительно друг друга. Импульсная характеристика фильтра состоит из суммы ФОТИ $f_i(l)$, которые умножаются на некоторые действительные числа (компоненты обратной матрицы $\Psi_{\frac{N}{2},j}^{-1}$).

Проведем практическую проверку данного способа решения обратной задачи. Для получения экспериментальных данных использовался ультразвуковой дефектоскоп УД9812 и специальное программное обеспечение, созданное автором. Прибор УД9812 соединяется с персональным компьютером через интерфейс USB. Программа на персональном компьютере выполняет все необходимые операции для решения обратной задачи – получает А-сканы от УД9812, производит выбор ФОТИ, выполняет расчет матрицы Ψ_{ij}^{-1} , обрабатывает эхосигналы.

На Рис.3 представлены результаты решения обратной задачи для донного эхосигнала в образце из алюминия Д16. Частота дискретизации данных 80МГц. Использовался прямой раздельно-совмещенный преобразователь П112-2,5-14 (частота уз. колебаний 2,5 МГц).

В качестве ФОТИ был взят донный эхосигнал, он отмечен маркерами на Рис.3А. Далее были синтезированы два фильтра – один на основе разложения по 120 ФОТИ со сдвигом 3 периода дискретизации, и другой – по 60 ФОТИ со сдвигом 6 периодов дискретизации. Отметим, что размер выборки А-скана для этих фильтров одинаковый и составляет 460 отсчетов. Результаты обработки А-скана Рис.3А демонстрируют Рис.3Б и Рис.3В. Оба фильтра преобразуют донный эхосигнал в короткий импульс. Однако качество решений сильно отличается. Обсудим причины этих отличий несколько позднее.

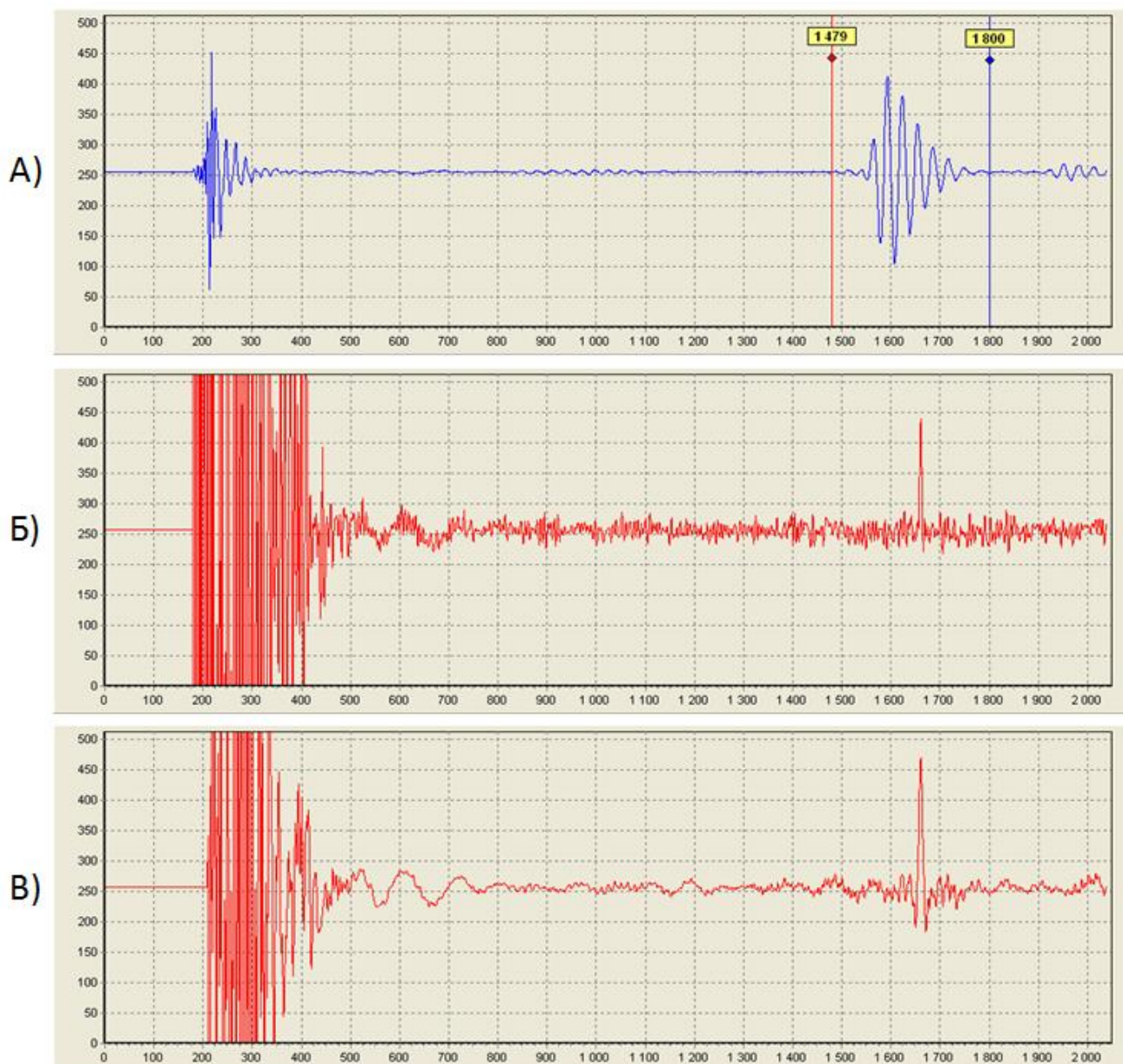


Рис.3. Выбор ФОТИ и примеры решения обратной задачи.

- А) А-скан. ФОТИ - донный эхосигнал в образце из алюминия Д16 толщиной 30мм. Частота дискретизации 80 МГц. Ультразвуковой преобразователь П112-2,5-14 .
 Б) Обработка обратным фильтром. Локальное разложение по 120 ФОТИ, сдвиг 3 периода дискретизации.
 Б) Обработка обратным фильтром. Локальное разложение по 60 ФОТИ, сдвиг 6 периодов дискретизации.

На Рис.4 представлены характеристики обратного фильтра, вариант разложения по 120 ФОТИ, сдвиг 3 периода дискретизации. Импульсная характеристика фильтра Рис.4А имеет очень сложную структуру, но, тем не менее, можно понять, что она состоит из суммы функций отклика точечного источника (Рис.3А).

Спектральные характеристики сигналов показаны на Рис.4В. Все спектры нормированы. Максимум спектральной плотности установлен в 1,0. Кривая 1 на Рис.4В зеленого цвета представляет спектр ФОТИ (донный эхосигнал Рис.3А). Максимум спектра наблюдается на частоте 2,55 МГц, ширина спектра на уровне 0,5 приблизительно 0,8 МГц.

Кривая 2 синего цвета показывает амплитудно-частотную характеристику коэффициента передачи обратного фильтра Рис.4А, или, что то же самое, спектр его импульсной

характеристики. Видно, что этот спектр является обратным по отношению к спектру ФОТИ как того и требует теоретическая модель, соотношение (3).

Спектр отклика обратного фильтра на ФОТИ показан на Рис.4В, кривая 3 красного цвета. Это спектр импульса в конце графика на Рис.3Б. Хорошо видно, что спектральная плотность результата обработки распределена в широком диапазоне частот, а во временной области ФОТИ преобразуется в короткий импульсный сигнал. Таким образом показано, что представленный алгоритм, основанный локально на разложении А-скана по ФОТИ, дает решение обратной задачи.

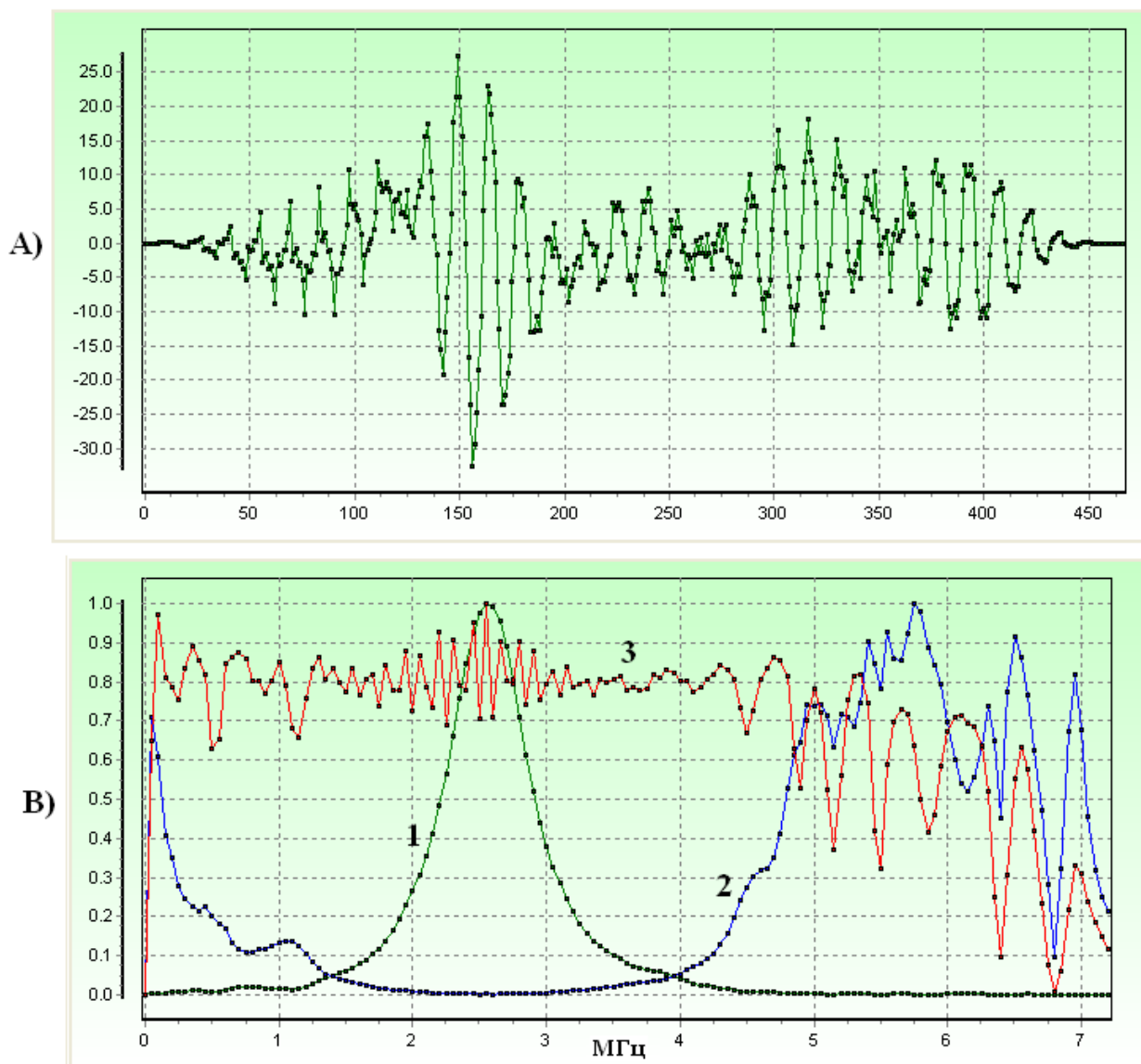


Рис. 4. Характеристики обратного фильтра построенного на основе локального разложения по 120 ФОТИ, сдвиг ФОТИ 3 периода дискретизации.

А) Импульсная характеристика обратного фильтра.

В) Спектральные характеристики.

1. Спектр ФОТИ.

2. Спектр импульсной характеристики обратного фильтра.

3. Спектр отклика обратного фильтра на ФОТИ.

Рассмотрим предложенный способ решения обратной задачи с точки зрения функционального анализа [5,6]. Фильтр, Рис.4., имеет длину 460 периодов дискретизации. Сигналы в выборке А-скана, на которые действует фильтр, образуют евклидово

функциональное пространство с размерностью 460. Его обычно обозначают как \mathbf{E}^{460} . Сигнал в выборке можно представить как вектор в многомерном пространстве \mathbf{E}^{460} .

Набор из 120 ФОТИ, по которому синтезировался фильтр Рис.4, образует подпространство с размерностью 120. ФОТИ в наборе имеют смещение всего на 3 периода дискретизации, поэтому они коррелируют между собой и их комплект представляет некоторую не ортогональную систему координат в \mathbf{E}^{460} . Обозначим подпространство ФОТИ как \mathbf{R}^{120} .

Работу фильтра Рис.3Б и Рис.4 можно объяснить следующим образом. Вектор из пространства \mathbf{E}^{460} (выборка А-скана) проектируется в подпространство \mathbf{R}^{120} (набор ФОТИ). В этом подпространстве производится разложение вектора сигнала по базисным функциям (ФОТИ). Получаем набор решений ρ_i , 120 величин. Величина из середины набора ρ_{60} выводится как результат действия фильтра.

Рассмотрим решение на Рис.3В. Здесь использовалось разложение по 60 ФОТИ со сдвигом 6 периодов дискретизации. Ширина выборки А-скана осталась такой же - 460 отсчетов. Поэтому выборка А-скана из пространства \mathbf{E}^{460} проектируется в пространство функций ФОТИ меньшей размерности \mathbf{R}^{60} .

Сравнивая решения на Рис.3Б и Рис.3В видно, что с уменьшением размерности подпространства ФОТИ уменьшается шум. Данный эффект связан с тем, что шум в исходных данных распределен по всему функциональному пространству \mathbf{E}^{460} , т.е. имеет отличные от нуля компоненты во всех размерностях этого пространства. Поэтому при проектировании вектора шума из \mathbf{E}^{460} в \mathbf{R}^{60} (Рис.3В), его амплитуда будет меньше по сравнению с вариантом проекции из \mathbf{E}^{460} в \mathbf{R}^{120} (Рис.3Б). С другой стороны, когда уменьшается размерность подпространства ФОТИ за счет увеличения сдвига между функциями, получаем решение худшего качества. Импульс отклика на Рис.3В стал несколько шире и в основании импульса появились паразитные колебания.

Хотелось бы объединить положительные стороны решений Рис.3Б и Рис.3В, т.е. использовать подпространство ФОТИ с низкой размерностью, что обеспечивает защищенность решения от шумов и помех, и организовать подпространство ФОТИ так, чтобы решение имело вид короткого импульса с минимальными паразитными колебаниями.

Заметим, что, как правило, на А-скане присутствует небольшое количество эхосигналов, которые разделяются паузами. Достаточно большая часть А-скана в паузах заполнена только шумами и помехами. Поэтому рационально сделать детальное разложение А-скана по ФОТИ в областях, заполненных эхосигналами, и исключить разложение А-скана в паузах.

Поступим следующим образом. В качестве первичной оценки решения используем алгоритм локального разложения с небольшим сдвигом ФОТИ. Например, рассмотренный ранее алгоритм разложения по 120 ФОТИ, сдвиг 3 периода дискретизации. Получим результат в виде комплекта оценок коэффициентов отражения ρ_i , 120 величин. Далее выберем некоторое количество минимальных оценок ρ_i , скажем 70 штук. Будем считать, что эти минимальные решения возникают из-за шумов и помех на А-скане. Следовательно, такие решения нужно исключить из локального разложения.

В матрице прямого преобразования Ψ_{ij} заполним нулями строки для выбранных минимальных решений, получим усеченную матрицу $\tilde{\Psi}_{ij}$. Затем выполним вычисление компонент обратной матрицы $\tilde{\Psi}_{ij}^{-1}$. Результат обработки найдем в виде решения для середины окна используя усеченную обратную матрицу $\tilde{\Psi}_{ij}^{-1}$ и известные значения свертки А-скана с ФОТИ P_i .

$$\rho_{\frac{N}{2}} = \sum_{j=1}^N \tilde{\Psi}_{\frac{N}{2},j}^{-1} P_j, \quad (9)$$

В итоге получился адаптивный алгоритм решения обратной задачи. Здесь, сначала находят решение в подпространстве ФОТИ с высокой размерностью. Затем выбираются базисные функции (ФОТИ), для которых решения минимальны. Эти базисные функции исключают из набора – определяют усеченную обратную матрицу $\tilde{\Psi}_{ij}^{-1}$. Тогда размерность подпространства ФОТИ снижается, и в нем находят решение по формуле (9). Такой алгоритм будем называть адаптивным обратным фильтром.

Алгоритм дает подробное решение для областей А-скана с эхосигналами, т.к. здесь получаются большие величины ρ_i , и отсекает решения для областей с паузами. Кроме того, обратная задача решается в подпространстве ФОТИ с низкой размерностью, что обеспечивает высокую шумо- и помехозащищенность.

На Рис.5. показан пример обработки с помощью адаптивного обратного фильтра. Используются экспериментальные данные из примера на Рис.3. Первичная оценка решения проводилась по 120 ФОТИ со сдвигом 3 периода дискретизации, т.е. на основе решения Рис.3Б. Затем из модели исключалось 70 ФОТИ с малыми ρ_i . Размерность задачи понижалась до 50 ФОТИ. Сравнивая результаты обратной фильтрации Рис.3Б и Рис.3В с действием адаптивного фильтра Рис.5 видно, что последний обеспечивает наилучшее качество решения обратной задачи – короткий отклик с низкими паразитными колебаниями и очень низкий уровень шумов.

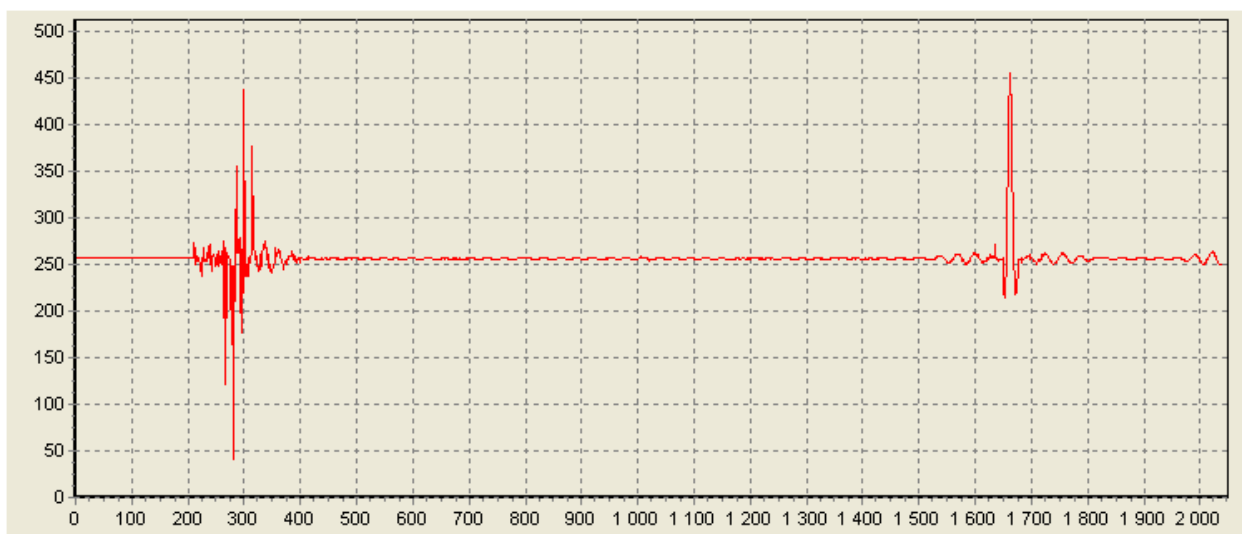


Рис.5. Пример обработки А-скана адаптивным обратным фильтром. Локальное разложение по 120 ФОТИ, сдвиг 3 периода дискретизации, понижение размерности до 50 ФОТИ.

Далее рассмотрим некоторые эксперименты по обработке эхосигналов адаптивным фильтром.

На Рис.6 показаны результаты прозвучивания образца из алюминия Д16. Использовался ультразвуковой преобразователь П112-2,5-14. На донной поверхности образца имеется ступенька размером 1мм. Здесь происходит наложение двух донных эхосигналов и формируется общий эхосигнал Рис.6Б, в котором полностью теряется информация об отражателях. Адаптивный обратный фильтр позволяет выделить положение каждой их донных поверхностей – Рис.6В. Лучевая разрешающая способность увеличивается примерно в 10 раз. В данном эксперименте применялся адаптивный обратный фильтр, который обсуждался выше (Рис.5).

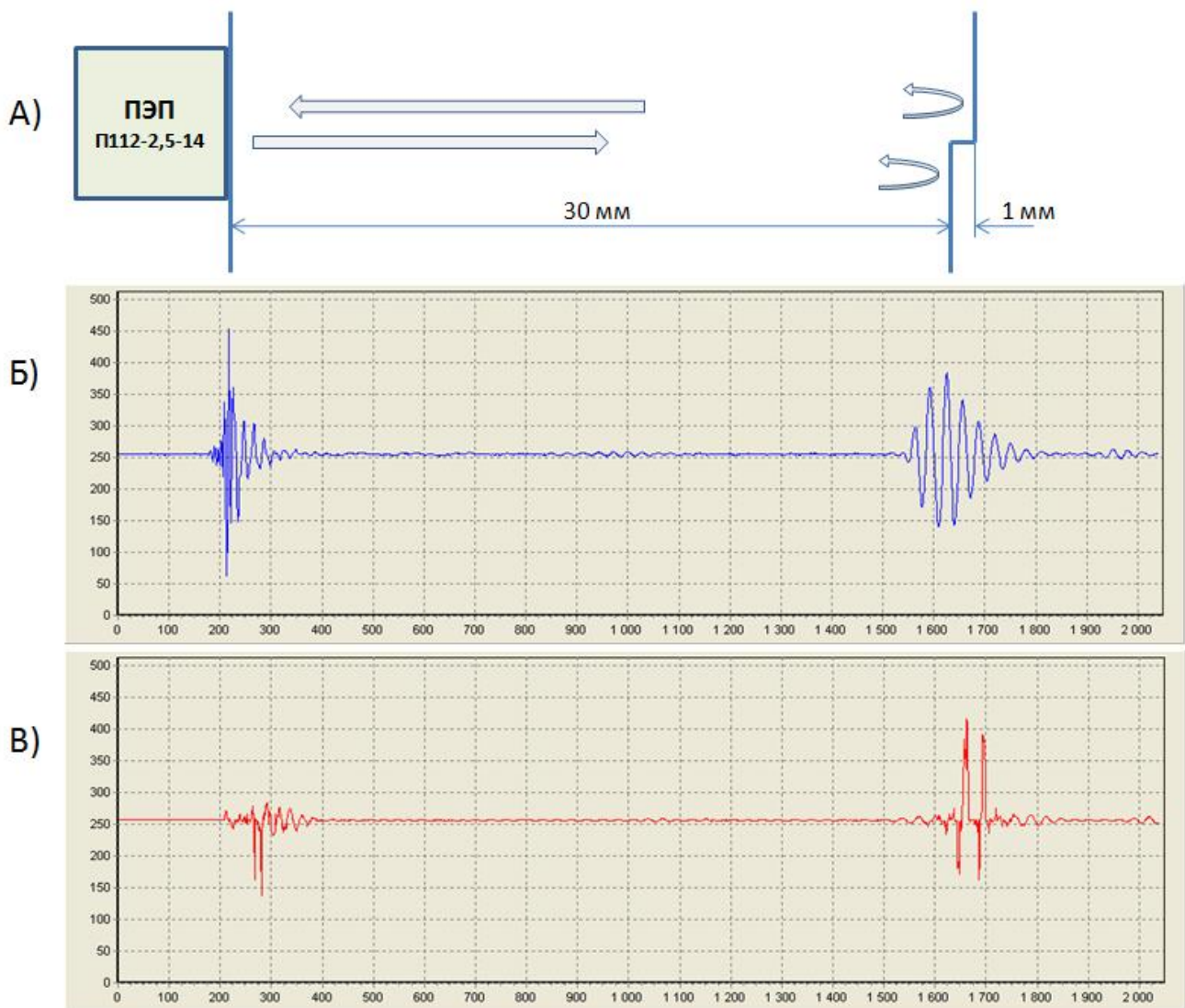


Рис.6. Решение обратной задачи для двух близко расположенных отражателей.

А) Схема прозвучивания образца из алюминия Д16, толщиной 30мм со ступенькой 1мм на донной поверхности. Ультразвуковой преобразователь П112-2,5-14.

Б) А-скан. Частота дискретизации 80 МГц.

В) Результат обработки адаптивным обратным фильтром. Локальное разложение по 120 ФОТИ, сдвиг 3 периода дискретизации, понижение размерности до 50 ФОТИ.

Эксперименты с использованием наклонного ультразвукового преобразователя П121-2,5-65°-Ø14 представлены на Рис.7 и Рис.8. В качестве ФОТИ был взят эхосигнал от нижнего угла образца из стали Ст10 толщиной 18мм – Рис.7. Выборка А-скана с ФОТИ указана маркерами на Рис.7Б. Адаптивный фильтр был построен на основе локального разложения по 60 ФОТИ со сдвигом 4 периода дискретизации и с дальнейшим понижением размерности до 30 ФОТИ. Результат действия фильтра представлен на Рис.7В. После обработки эхосигнал сжимается примерно в 7 раз.

На А-скане Рис.7В присутствует ряд эхосигналов небольшой амплитуды. Эхосигнал в середине графика образуется при отражении волн от передней грани преобразователя.

В конце А-скана наблюдаются эхосигналы, следующие за основным отражением от угла (ФОТИ). Они формируются довольно сложным образом. При отражении поперечных волн от

нижнего угла образца Рис.7А происходит их преобразование в продольные волны и возникают волны Рэля, которые распространяются по граням образца. Волна Рэля, бегущая по вертикальной стенке, отражается от углов образца и переизлучается в поперечные волны с широкой диаграммой направленности. Указанные волны принимаются преобразователем, так образуются эхосигналы в конце А-скана. Процесс двойной трансформации волн вносит большие спектральные искажения в ультразвуковые импульсы, поэтому адаптивный обратный фильтр не может обработать их корректно.

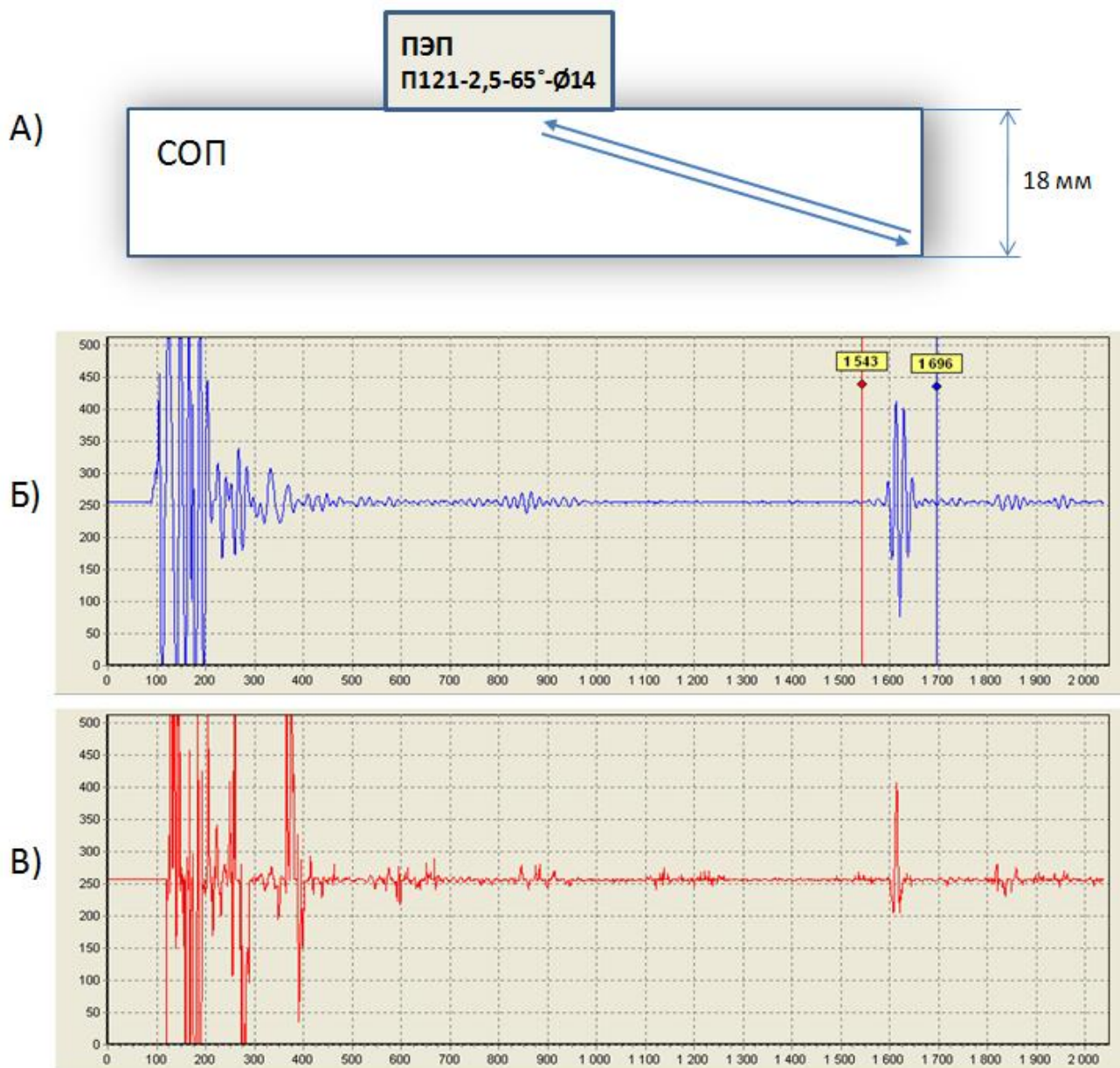


Рис.7. Выбор ФОТИ и пример решения обратной задачи для наклонного ультразвукового преобразователя.

- А) Схема прозвучивания образца из стали Ст10, толщиной 18мм. Ультразвуковой преобразователь П121-2,5-65°-Ø14.
- Б) А-скан. ФОТИ – эхосигнал от нижнего угла образца. Частота дискретизации 80 МГц.
- В) Результат обработки адаптивным обратным фильтром. Локальное разложение по 60 ФОТИ, сдвиг 4 периода дискретизации, понижение размерности до 30 ФОТИ.

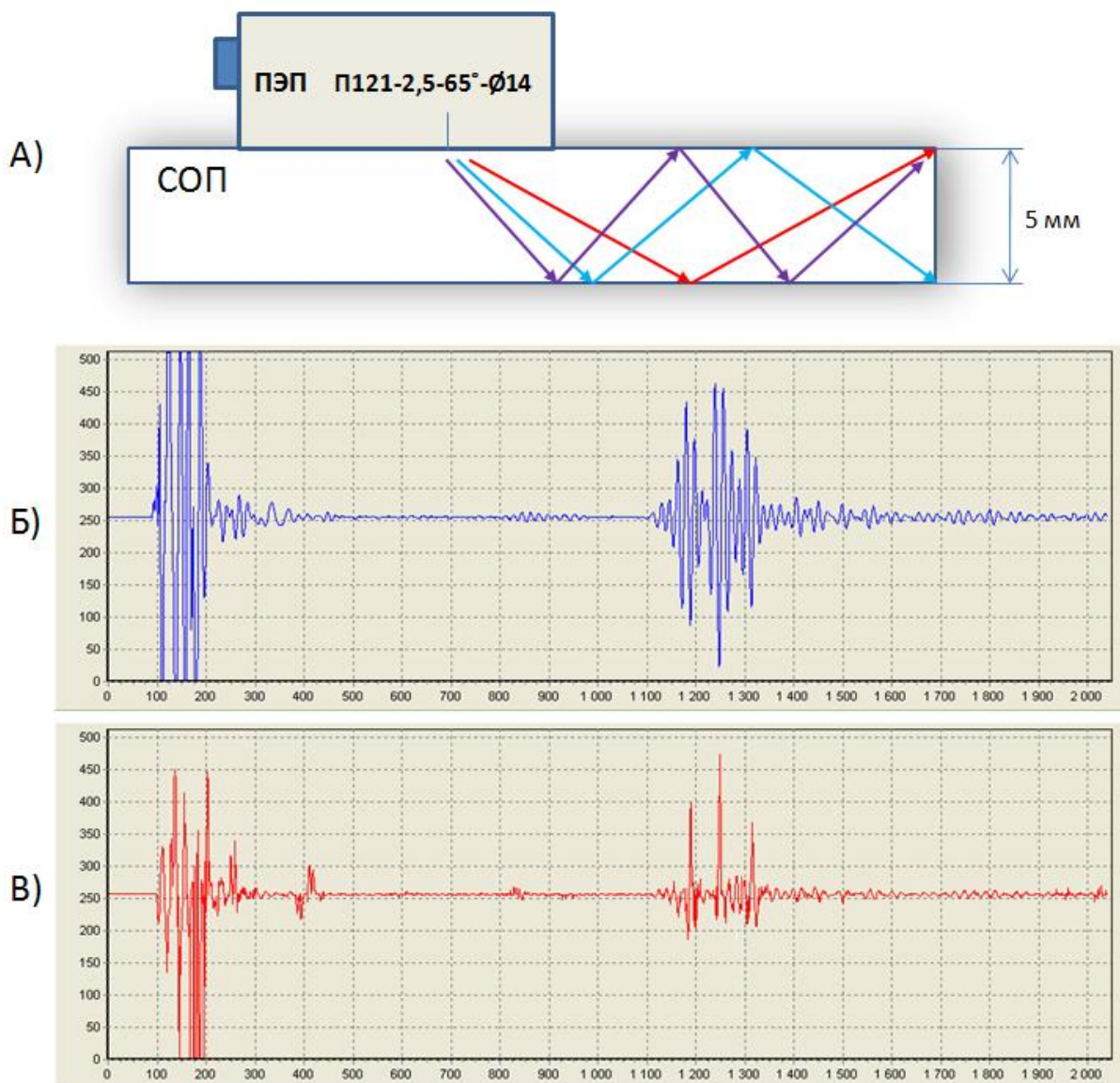


Рис.8. Пример решения обратной задачи для наклонного ультразвукового преобразователя.

- А) Схема прозвучивания образца из стали Ст10, толщиной 5мм. Ультразвуковой преобразователь П121-2,5-65°-Ø14.
- Б) А-скан. Многократные отражения от верхнего нижнего углов образца. Частота дискретизации 80 МГц.
- В) Результат обработки адаптивным обратным фильтром. Локальное разложение по 60 ФОТИ, сдвиг 4 периода дискретизации, понижение размерности до 30 ФОТИ.

На Рис.8 представлен пример наложения эхосигналов от верхнего и нижнего углов стального образца толщиной 5мм. Схема прозвучивания изображена на Рис.8А. Эхосигналы на А-скане Рис.8Б расположены очень близко друг от друга, почти сливаются. После обработки адаптивным обратным фильтром получают короткие импульсы коэффициента отражения Рис.8В. Здесь видны паразитные колебания в основании группы импульсов. Это сигналы от переизлученных волн Рэлея возникающих на вертикальной грани образца. Отметим, что адаптивный фильтр выполняет преобразование таких сигналов с небольшим коэффициентом передачи, т.е. практически не усиливает их.

Подведем итоги. В данной работе предложен способ решения одномерной обратной акустической задачи, основанный на локальном разложении А-скана по набору функций отклика точечного источника. Причем процедура расчета представляет собой оконную операцию – определение результата в процессе обработки ограниченной области А-скана.

Показано, что такие вычисления эквивалентны действию фильтра с конечной импульсной характеристикой и соответствуют теоретическим представлениям, формулы (7) и (8).

Кроме того, предложен новый помехоустойчивый алгоритм решения обратной задачи, названный автором – адаптивный обратный фильтр. Эффективность адаптивной фильтрации связана с рациональным выбором комплекта базисных функций (ФОТИ), в пространстве которых производится решение обратной задачи. Следует отметить, что снижение размерности подпространства ФОТИ за счет исключения решений малой амплитуды, не является единственным. Можно модифицировать и улучшить критерии отбора базисных функций, тогда стоит надеяться, что будут найдены более совершенные способы обработки.

Все варианты преобразования эхосигналов апробированы на практике. Проведено испытание алгоритмов на экспериментальных данных, А-сканах. Показано, что при использовании стандартных ультразвуковых преобразователей достигается улучшение лучевой разрешающей способности дефектоскопа до 10 раз.

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.
3. Бархатов В.А. Решение одномерной обратной акустической задачи с учетом дисперсии скорости звука и частотно-зависимого затухания волн. Дефектоскопия №1, 2009, с.40-53.
4. Бархатов В.А. Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи. Дефектоскопия, № 12, 2012, с.
5. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. Изд-во: ВНУ, 2004 г., 816с.
6. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа М.: Наука, 1976.