

УСТРАНЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ТИПА НАСЫЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭХОСИГНАЛА МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ И МЕТОДОМ ГЕРШБЕРГА—ПАПУЛИСА

Е.Г. Базулин

При проведении ультразвукового контроля может возникнуть ситуация, когда значения регистрируемых эхосигналов будут больше динамического диапазона приемного усилителя и аналого-цифрового преобразователя дефектоскопа. Это приведет к тому, что эхосигналы импульсов большой амплитуды подвергнутся операции отсечки (клиппированию) и уменьшат свою амплитуду, что может привести к ошибке при оценивании размеров отражателя. Предложен метод деклиппирования, основанный на алгоритме Гершберга—Папулиса, и проведено его сравнение с методом деклиппирования, использующим метод наименьших квадратов. Численные и модельные эксперименты показали, что метод Гершберга—Папулиса работает устойчивее, чем метод наименьших квадратов, для зашумленных эхосигналов и в случае грубого шага их дискретизации.

Ключевые слова: метод цифровой фокусировки антенной (ЦФА), total focusing method (TFM), метод наименьших квадратов (МНК), LSE, RBAR, метод Гершберга—Папулиса.

ВВЕДЕНИЕ

Информация о типе, размерах отражателя и месте его залегания заключена в форме эхосигнала и, в частности, во времени его задержки и амплитуде. В практике ультразвукового контроля может случиться так, что из-за особенностей приемного тракта дефектоскопа эхосигнал будет искажен: при достижении некоторого уровня на выходе приемного усилителя амплитуда сигнала достигнет максимума. Ограничение, но уже при оцифровке эхосигнала может произойти в случае, если его амплитуда превысит опорный уровень аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В идеальном случае такие нелинейные искажения можно описать операцией отсечки, при которой значения сигнала не могут выходить за пределы заданного интервала. Для описания этого эффекта в зарубежной литературе используют термины **nonlinear distortion** или **clipping** (клиппирование). Проблема исключения влияния клиппирования актуальна и при обработке аудиосигналов. Если на вход системы распознавания речи будет подан клиппированный сигнал (например, голосовая команда на фоне громкого звука взрыва), то надежность ее работы уменьшится. Подобная проблема возникает и при высококачественной записи музыки, для сигналов которой характерен очень большой динамический диапазон.

Понятно, что это приводит к возникновению обратной задачи, то есть к разработке методов восстановления исходной формы эхосигнала по его искаженному виду (деклиппированию). Для восстановления неискаженной формы сигнала в моменты времени, когда он ограничен, используют методы экстраполяции или интерполяции. В [1—3] для экстраполяции использовали различные процедуры построения (**autoregressive method**) AR-модели сигнала. Для выполнения процедуры деклиппирования было предложено использовать методы recursive vector projection [2], reconstructions based on sparse representations of speech [3, 4], compressed sensing [5] или МНК [6].

Разработанные методы имеют такие недостатки, как неустойчивая работа при малых уровнях отсечки и грубой частоте дискретизации эхосигналов. Наличие шума в сигнале также приводит к ошибкам работы упомянутых методов. Поэтому разработка метода деклиппирования, устойчивого для малых уровней отсечки при наличии шума, является актуальной задачей.

1. МЕТОДЫ ДЕКЛИППИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Методы деклиппирования сигналов предназначены для восстановления исходной формы сигнала $s(t)$ в тех временных интервалах, где произошло его насыщение, возникающее из-за особенности работы усилителей приемного тракта ультразвукового дефектоскопа. Этот эффект можно описать в простейшем случае как нелинейную операцию отсечки L согласно формуле

$$s_l(t) = L(s(t), l) = \begin{cases} l, & \text{для } s(t) > l \\ -l, & \text{для } s(t) < -l \end{cases} \quad (1)$$

Сигнал, подвергнутый операции клиппирования согласно формуле-, будем записывать как $s_l(t)$. Через $\{t\} = (\{t_-\}, \{t_+\})$ обозначим множество интервалов времени, когда сигнал $s(t)$ меньше уровня $-l$ или больше уровня l . Фигурные скобки указывают на то, что может быть больше одного временного интервала $\{t_-\}$ или $\{t_+\}$.

Под операцией деклиппирования будем подразумевать построение оператора L^{-1} , позволяющего по клиппированному сигналу $s_l(t)$ найти его неискаженный вид $s(t)$. Отметим, что уровень отсечки может быть функцией времени, то есть $l = l(t)$, и иметь различный вид для положительных и отрицательных частей сигнала $s(t)$. Эффективность операции деклиппирования зависит от многих факторов. Это, во-первых, аналитические свойства сигнала $s(t)$, например, ограниченность его полосы частот. Учет этих особенностей может помочь построению эффективного оператора деклиппирования L^{-1} сигнала. Во-вторых, приемный усилитель может исказить эхосигнал при приближении его значений к уровню отсечки l . Это может привести к более сложному виду, чем идеальная операция отсечки (1), к искажению сигнала, что повлияет на точность восстановления сигнала $s(t)$. В-третьих, частота дискретизации эхосигнала сильно влияет на работу оператора L^{-1} . На интервале между ближайшими областями с отрицательным $\{t_-\}$ и положительным $\{t_+\}$ уровнями отсечки сигнал $s(t)$ может меняться с наибольшей скоростью. Такие интервалы далее будем обозначать $\{t_{\mp}\}$, их размеры могут быть много меньше размеров интервалов $\{t_-\}$ или $\{t_+\}$. В результате из-за малой частоты дискретизации или малом уровне клиппирования количество отсчетов на $\{t_{\mp}\}$ -интервале может оказаться недостаточным (они вообще могут отсутствовать) для оценки поведения $s(t)$ на временных интервалах $\{t\} = \{\{t_-\}, \{t_+\}\}$.

1.1. Метод наименьших квадратов

Рассмотрим подробнее один из методов деклиппирования, основанный на применении МНК [7, 8]. Дискретизированный исходный сигнал $s(t)$ в виде вектора длиной N_s обозначим как \mathbf{s} , а искаженный согласно формуле (1) исходный сигнал \mathbf{s} — через \mathbf{s}_l . Идея деклиппирования МНК заключается в том, чтобы минимизировать оценку сигнала с использованием некоего критерия, в качестве которого можно рассматривать производную сигнала заданного порядка m . Для расчета производной можно использовать матрицу Тёплица \mathbf{D} [7]. Смысл такого подхода заключается в том, что деклиппирование сигнала \mathbf{s}_l , то есть его интерполяция в область $\{t\} = \{\{t_-\}, \{t_+\}\}$, происходит с использованием полинома порядка m . При $m = 2$ интерполяция происходит с помощью параболы.

Рассмотрим подробнее этот метод. Обозначим через \mathbf{s}^0 список длиной N_s^0 с указанием номеров вектора с неискаженными значениями сигнала \mathbf{s}_p , а через \mathbf{s}^x — вектор длиной $N_s^x = N_s - N_s^0$ с номерами, где сигнал \mathbf{s}_l ограничен согласно (1). Клиппированный сигнал \mathbf{s}_l можно представить в виде

$$\mathbf{s}_l = \mathbf{M}_0^T \mathbf{s}^0 + \mathbf{M}_x^T \mathbf{s}^x, \quad (2)$$

где $\mathbf{s}_l^0 = \mathbf{s}_l(\mathbf{s}^0)$, $\mathbf{s}_l^x = \mathbf{s}_l(\mathbf{s}^x)$. Матрицу \mathbf{M}_0 можно получить, оставляя от диагональной единичной матрицы размером $N_s \times N_s$ столбцы по списку \mathbf{s}^0 . По списку \mathbf{s}^x аналогично формируется матрица \mathbf{M}_x . Задачу деклиппирования можно сформулировать как поиск минимума функции

$$\min_{\mathbf{s}_l^x} \left\| \mathbf{D}_m (\mathbf{M}_0^T \mathbf{s}^0 + \mathbf{M}_x^T \mathbf{s}^x) \right\|_2^2. \quad (3)$$

Например, матрица \mathbf{D}_m для третьей производной $m = 3$ имеет вид

$$\mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 & & & & & \\ & 1 & -3 & 3 & -1 & & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & & & 1 & -3 & 3 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Решение задачи оптимизации можно получить в явном виде

$$\mathbf{s}_l^x = - \frac{\mathbf{M}_x \mathbf{D}_m^T \mathbf{D}_m \mathbf{M}_0^T \mathbf{s}^0}{\mathbf{M}_x \mathbf{D}_m^T \mathbf{D}_m \mathbf{M}_x^T}. \quad (5)$$

Таким образом, с помощью метода деклиппирования по формуле (5), который в зарубежной литературе называется **Constrained Blind Amplitude Reconstruction (CBAR) algorithm**, можно оценить значение сигнала \mathbf{s} в точках по списку \mathbf{s}_l . Оценку полученного решения будем обозначать как $\hat{s}(t)$.

Естественно возникает вопрос, какой порядок m производной нужно выбирать. Здесь возникают два аспекта. Во-первых, если минимальное число отсчетов на интервалах $\{t_{\mp}\}$ равно n_{\mp} , то для расчета производной второго порядка нужно иметь минимум три отсчета, то есть $m = n_{\mp} - 1$. Во-вторых, порядок m зависит от уровня отсечки l . Если считать, что операции отсечки подвергается положительный полупериод функции $s(t) = \cos(2\pi ft)$, то интервал $\{t_{+}\}$ зависит от уровня отсечки l . Разложив в ряд Маклорена сигнал $s(t) \approx s_M(t) = 1, 0 - t^2/2 + t^4/4! - t^6/6! + \dots$, можно определить максимально используемую степень m по условию $|s(t_l) - s_M(t_l)| < 0,01$ для t_l на краю интервала $\{t_{+}\}$. При уровне отсечки $l > 0,7$ точность 0,01 достигается при $m = 2$, а при $l > 0,2$ можно ограничиться порядком $m = 4$. Выбор порядка $m = 6$ обеспечивает разницу $|s(t_l) - s_M(t_l)| < 0,01$ для $t_l = 0,5/f$. Конечно, для сигнала, отличного от $s(t) = \cos(2\pi ft)$, такая оценка может оказаться недостаточно точной, так как $s(t)$ может иметь более сложный вид.

1.2. Регуляризованный метод наименьших квадратов

В [8] была предложена регуляризованная модификация алгоритма деклиппирования на основе МНК (CBAR), в котором в качестве регуляризирующего штрафного функционала используется энергия сигнала, рассчитываемая отдельно для областей $\{t_{+}\}$ и $\{t_{-}\}$

$$\mathbf{s}_l^x = - \frac{(\mathbf{M}_x \mathbf{D}_m^T \mathbf{D}_m \mathbf{M}_0^T \mathbf{s}_l^0 - \lambda(\mathbf{M}_+^T \mathbf{1}_+ - \mathbf{M}_-^T \mathbf{1}_-))}{(\mathbf{M}_x \mathbf{D}_m^T \mathbf{D}_m \mathbf{M}_x^T + \lambda(\mathbf{M}_+^T \mathbf{M}_+ + \mathbf{M}_-^T \mathbf{M}_-))}, \quad (6)$$

где $\mathbf{1}_+$ и $\mathbf{1}_-$ — векторы с целевыми значениями сигнала; \mathbf{M}_+ и \mathbf{M}_- — матрицы, построенные по тому же принципу что и \mathbf{M}_0 , но отдельно для областей $\{t_{+}\}$ и $\{t_{-}\}$; λ — коэффициент регуляризации. В упомянутой статье не было сказано о том, как выбирать значения λ . Кроме того, выбор векторов $\mathbf{1}_+$ и $\mathbf{1}_-$ с целевыми значениями — это особая и не очевидная процедура, требующая отдельного обоснования и проведения расчетов. Регуляризованный алгоритм (6) в зарубежной литературе называется **Regularized Blind Amplitude Reconstruction (RBAR) algorithm**.

1.3. Метод Гершберга—Папулиса

Будем полагать, что спектр эхосигнала $s(t)$, который обозначим как $s(f) = \mathfrak{F}(s(t))$, ограничен частотным интервалом (f_{\min}, f_{\max}) . Операторы прямого и обратного преобразований Фурье обозначим как \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} , операцию ограничения спектра — оператором B , который обнуляет функцию $s(f)$ вне пределов интервала (f_{\min}, f_{\max}) . Такая ситуация характерна для ультразвукового контроля, где основной вклад в ограничение полосы акустического тракта вносит пьезопреобразователь [9]. Нелинейная операция клиппирования L по уровню l согласно приводит к тому, что сигнал $s_l(t)$ будет иметь спектр, отличный от нуля за пределами интервала (f_{\min}, f_{\max}) , чего быть не должно по физическим соображениям. Это позволяет записать уравнение

$$s(t) = \mathfrak{F}^{-1}(B(\mathfrak{F}(L(s(t), l))))). \quad (7)$$

Произведение операторов B и L делает уравнение (7) нелинейным. Для его решения можно воспользоваться итерационной процедурой разложения в ряд Неймана [10]

$$s_{i+1}(t) = \begin{cases} \mathfrak{F}^{-1}(B(\mathfrak{F}(s_i(t)))) & t \in \{t\} \\ s_i(t) & t \notin \{t\} \end{cases}. \quad (8)$$

В качестве начального приближения можно выбрать $s_0(t) = s_l(t)$. Подобный подход применялся для экстраполяции спектра эхосигнала, ограниченного во времени, на больший частотный интервал [11].

Дополнительным условием, улучшающим процесс сходимости, является то обстоятельство, что сигнал $s_l(t)$ на любой итерации в областях клиппирования $\{t\} = \{\{t_{-}\}, \{t_{+}\}\}$ не может иметь значение в диапазоне $[-l, l]$, то есть должен удовлетворять условию

$$s_{i+1}(t) = \begin{cases} l, & \text{если } s_i(t \in \{t_+\}) < l \\ -l, & \text{если } s_i(t \in \{t_-\}) > -l \end{cases}. \quad (9)$$

Эффективность получения оценки сигнала $\hat{s}(t)$ с помощью итерационной процедуры (8) зависит от уровня клиппирования l и от того, насколько точно известен частотный интервал (f_{\min}, f_{\max}) спектра исходного сигнала. Далее нижняя f_{\min} и верхняя f_{\max} частоты сигнала $s(t)$ определялись по уровню 0,1 спектра неискаженного эхосигнала $s(t)$. Отметим, что предложенный в этом разделе алгоритм принадлежит к тому же классу, что и рассмотренный в [3].

1.4. Принцип сравнения между собой результатов деклиппирования

Работа с рассмотренными выше методами деклиппирования показала, что в зависимости от пристрастия исследователя можно подобрать примеры обработки и конкретный эхосигнал, которые будут подчеркивать достоинства одного из методов. Поэтому для повышения объективности при сравнении между собой результатов деклиппирования применялись два критерия, позволяющие оценить разницу между двумя сигналами $s(t)$ и $\hat{s}(t)$

$$\begin{aligned} \Delta_1(s(t), \hat{s}(t)) &= \max(s(t) - \hat{s}(t)) \\ \Delta_2(s(t), \hat{s}(t)) &= \sqrt{\int_{A_t} (s(t) - \hat{s}(t))^2 dt} \end{aligned}, \quad (10)$$

где A_t — временная апертура сигнала.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Работоспособность предложенного алгоритма деклиппирования проверялась на эхосигналах, рассчитанных в численном эксперименте, с использованием программы CIV4 (версия 11a) [12]. В численных и модельных экспериментах парциальные изображения восстанавливались методом ЦФА [13]. Для краткости такие изображения далее будут называться ЦФА-изображениями.

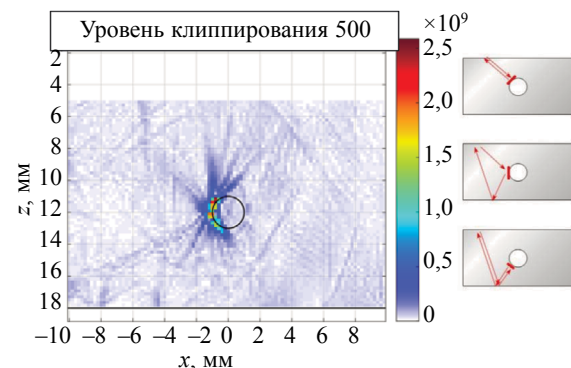
В двумерном варианте были рассчитаны эхосигналы, отраженные от отверстия бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 12 мм в стальном образце толщиной 18 мм. Расчет проводился для антенной решетки (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, размер элементов 0,76 мм, зазор между ними 0,04 мм), установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 градусов. Так как в программе CIV4 была выбрана модель дифракции по Кирхгофу, то импульс обегания не рассчитывался.

Эхосигналы, деклиппированные методом Гершберга—Папулиса, для краткости будем называть ГП-эхосигналами, а эхосигналы, деклиппированные методом наименьших квадратов, — МНК-эхосигналами.

2.1. Дискретизация 50 МГц

На рис. 1 показано ЦФА-изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным с частотой дискретизации 50 МГц и клиппированным по уровню 500 (24,4 %) от максимального значения 2048 согласно формуле (1). ЦФА-изображение было получено при когерентном сложении трех парциальных изображений, восстановленных на поперечной волне по акустическим схемам: на прямом луче, при однократно отраженном от дна при излучении и на прямом луче при приеме и при однократно отраженном от дна при излучении и приеме.

Рис. 1. ЦФА-изображение при уровне отсечки 500. Пиктограммы трех акустических схем показаны справа от ЦФА-изображения.



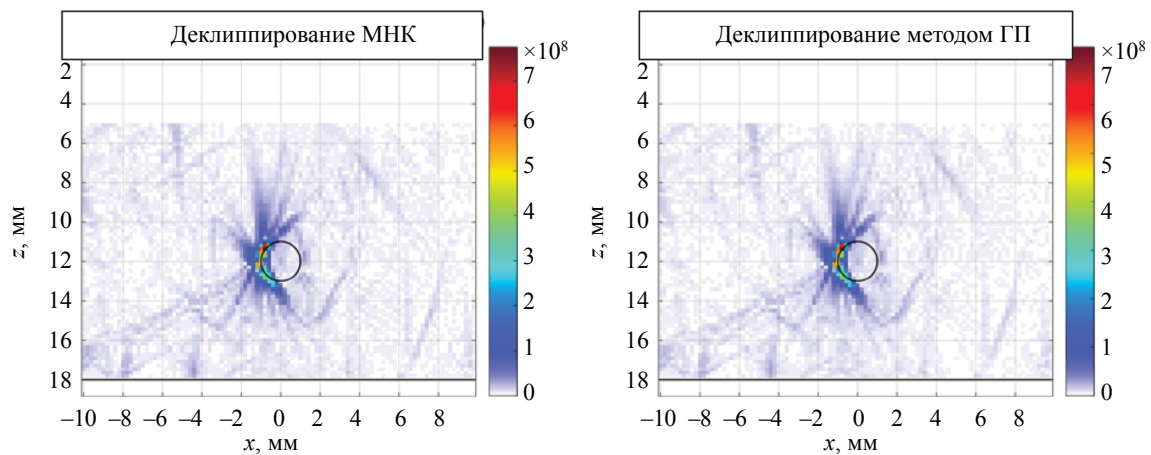


Рис. 2. ЦФА-изображение (уровень отсечки 500) при деклиппировании эхосигналов МНК (слева) и методом Гершберга—Папулиса (справа).

На рис. 2 слева показано ЦФА-изображение, восстановленное по МНК-эхосигналам при $m = 6$ по формуле (5), а справа — по ГП-эхосигналам для полосы частот 0,5; 10 МГц согласно формуле (8). Изображения практически не отличаются друг от друга, но по сравнению с изображением на рис. 1 уровень шума уменьшился примерно на 2,5 дБ.

На рис. 3 показано ЦФА-изображение, восстановленное по эхосигналам, клипированным по уровню 50 (2,44 %) при когерентном сложении трех парциальных изображений. В сравнении с изображением на рис. 1 уровень шума возрос примерно на 8,5 дБ.

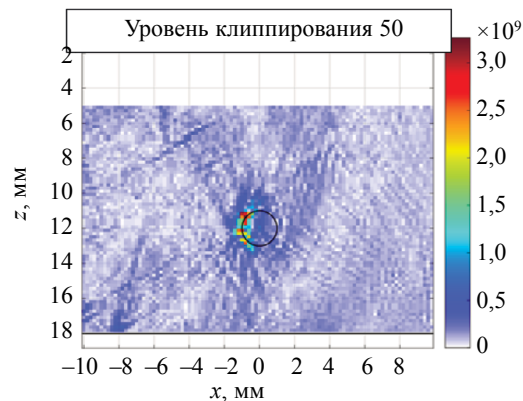


Рис. 3. ЦФА-изображение при уровне отсечки 50.

На рис. 4 слева показано ЦФА-изображение, восстановленное по МНК-эхосигналам при $m = 3$, а справа — по ГП-эхосигналам для полосы частот 0,5; 10 МГц. По сравнению с изображениями на рис. 2 слева деклиппирование МНК приводит к неудовлетворительному результату, так как уровень шума можно оценить как 21 дБ, а изображение, полученное по ГП-эхосигналам, имеет отношение сигнал/шум 38 дБ и практически не отличается от рис. 2 справа. Только уровень шума возрос на 1,5 дБ.

Причина такого разного результата деклиппирования объясняется следующим образом. Низкий уровень отсечки приводит к тому, что на $\{t_{\mp}\}$ -интервалах количество отсчетов уменьшилось (а то и вовсе стало нулевым) и при деклиппировании МНК не удается правильно оценить вид интерполяционного полинома. Это приводит к недопустимо сильному искажению эхосигнала. Для исключения потери устойчивости метода (5) пришлось уменьшить порядок модели с 6 (для уровня отсечки 500) до 3. С одной стороны, при больших порядках МНК терял устойчивость и в эхосигналах возникали выбросы, в десятки и сотни раз превышающие максимальное значение исходного сигнала. С другой стороны, уменьшение порядка МНК привело к тому, что форма деклиппированного сигнала стала недопустимо искажаться.

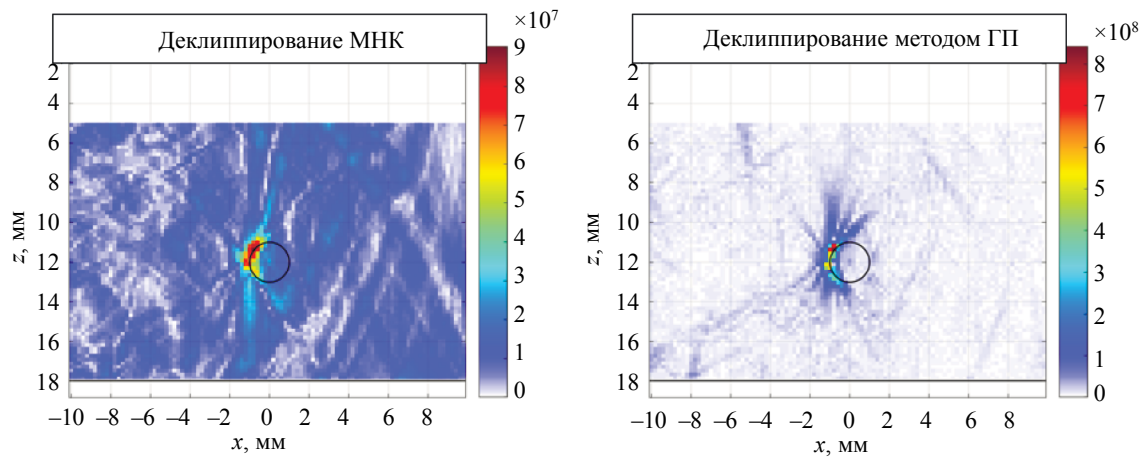


Рис. 4. ЦФА-изображение (уровень отсечки 50) при деклиппировании эхосигналов МНК (слева) и методом Гершберга—Папулиса (справа).

На рис. 5 в растровом виде показаны эхосигналы 17-го выстрела, то есть эхосигналы, принятые всеми элементами антенной решетки при излучении 17-ым элементом. Для упрощения визуального восприятия эхосигналы были проселектированы по времени от 38 до 43 мкс. Эти сигналы будут рассматриваться как неискаженные $s(t)$. Слева от растрового изображения схематически показаны акустические схемы и соответствующие им эхосигналы.

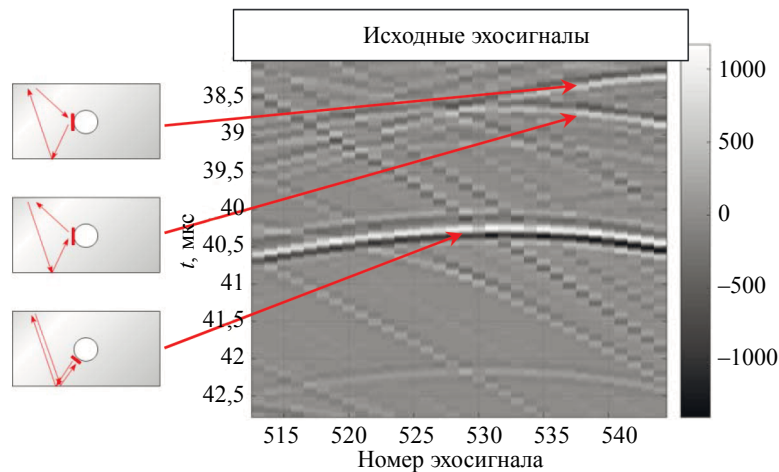


Рис. 5. Неискаженные эхосигналы 17-го выстрела.

Рассмотрим теперь работу сравниваемых методов деклиппирования при добавлении к сигналам $s_i(t)$ шума с нормальным законом распределения со среднеквадратическим отклонением σ , равным уровню отсечки и нулевым матожиданием. На рис. 6 слева показаны МНК-эхосигналы при $m = 2$, а справа — ГП-эхосигналы. Несмотря на то, что после деклиппирования методом Гершберга—Папулиса появились выбросы, в два раза превышающие значение исходного сигнала $s(t)$, полученный результат принципиально лучше МНК-эхосигналов. Это объясняется тем, что метод Гершберга—Папулиса автоматически проводит полосовую фильтрацию эхосигналов в полосе частот (f_{\min}, f_{\max}) , что повышает отношение сигнал/шум, а МНК работает с исходным зашумленным сигналом.

Деклиппирование эхосигналов по регуляризованному алгоритму RBAR по формуле (6) для случая, когда целевые значения I_+ и I_- определялись уровнем отсечки, не дало интересного результата. При увеличении коэффициента λ оценка сигнала стремилась к виду клиппированного сигнала, то есть $\hat{s}(t) \rightarrow s_i(t)$. При увеличении порядка m деклиппирование было более устойчивым, но снова $\hat{s}(t) \rightarrow s_i(t)$. Проблема деклиппирования методом RBAR порождает новую проблему — проблему оценки целевых значений I_+ и I_- !

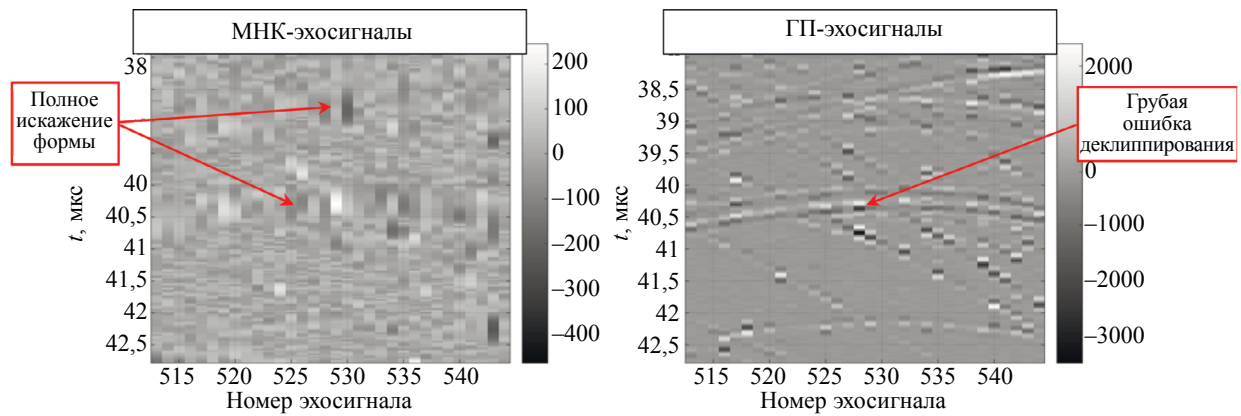


Рис. 6. МНК-эхосигналы 17-го выстрела (слева) и ГП-эхосигналы (справа) с добавлением шума с нормальным законом распределения и дисперсией, равной уровню отсечки (уровень отсечки 50).

2.2. Дискретизация 200 МГц

С помощью фурье-интерполяции частота дискретизации исходных эхосигналов была увеличена в четыре раза с 50 до 200 МГц [14]. На рис. 7 слева показано ЦФА-изображение, восстановленное по МНК-эхосигналам при $m = 4$, а справа — по ГП-эхосигналам для полосы частот 0,5; 10,0 МГц. ЦФА-изображение неудовлетворительного качества и подобно ЦФА-изображению на рис. 4 слева. ЦФА-изображения, восстановленные по ГП-эхосигналам снова, практически не отличаются от изображения на рис. 2 справа. Важно отметить, что малый уровень клиппирования и увеличившаяся в четыре раза длина эхосигналов N_s привели к тому, что для деклиппирования методом Гершберга—Папулиса полного набора из 1 024 эхосигналов при максимальном числе итераций, равном 10 000, потребовалось 4 100 секунд. Деклиппирование МНК оказалось в 510 раз быстрее. Однако в рассматриваемом случае быстро не означает хорошо!

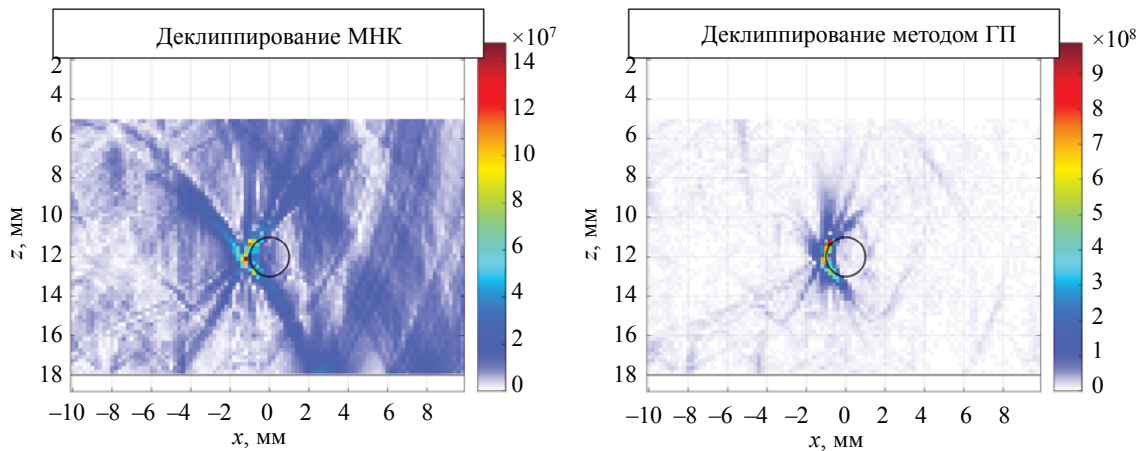


Рис. 7. ЦФА-изображение (уровень отсечки 50) при деклиппировании эхосигналов МНК (слева) и методом Гершберга—Папулиса (справа) при частоте дискретизации 200 МГц.

На рис. 8 слева показаны МНК-эхосигналы при $m = 2$ и добавлении к сигналам $s_i(t)$ шума с нормальным законом распределения с отклонением σ , равным уровню отсечки и нулевым матожиданием, а справа — ГП-эхосигналы. Несмотря на то, что после деклиппирования методом Гершберга—Папулиса появились выбросы, в два раза превышающие значение исходного сигнала $s(t)$, полученный результат принципиально лучше МНК-эхосигналов, показанных на рис. 8 слева, и тем более лучше МНК-эхосигналов для частоты дискретизации 50 МГц (см. рис. 6 слева). Попытка применить для деклиппирования МНК порядок $m = 3$ привела к еще большему, чем на рис. 8 слева, ухудшению эхосигналов.

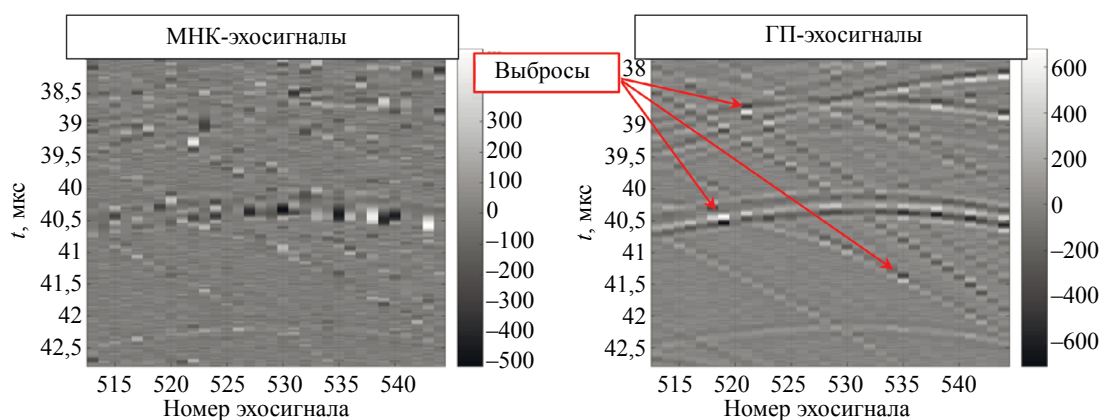


Рис. 8. MNK-эхосигналы 17-го выстрела (слева) и ГП-эхосигналы (справа) с добавлением аддитивного шума с нормальным законом распределения и дисперсией, равной уровню отсечки для частоты дискретизации 200 МГц (уровень отсечки 50).

3. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Модельные эксперименты проводились с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР-АРТ», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+». Исключение составляет модельный эксперимент, описанный в разделе 3.2., в котором измерения эхосигналов проводились с помощью специально настроенного ФАР-дефектоскопа «Х-32» [15]. Разрядность аналого-цифрового преобразователя ЦФА-дефектоскопа «АВГУР-АРТ» равна 12 разрядам, а ФАР-дефектоскопа «Х-32» — 9.

3.1. Эхосигналы от отверстия диаметром 2 мм в образце толщиной 18 мм

Эхосигналы регистрировались от отверстия диаметром 2 мм на глубине 12 мм в стальном образце толщиной 18 мм с помощью антенной решетки (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор 0,1 мм) на рексолитовой призме с углом наклона 35 градусов. Измерения проводились для двух значений коэффициента усиления: 56 и 62 дБ. Частота дискретизации была равна 100 МГц.

Для уменьшения объема информации анализировались эхосигналы 17-го выстрела. На рис. 9 показаны неискаженные эхосигналы, измеренные при коэффициенте усиления 56 дБ. Стрелки красного цвета устанавливают связь между эхосигналами и акустической схемой их формирования, пиктограммы которых показаны слева от растрового изображения эхосигналов.

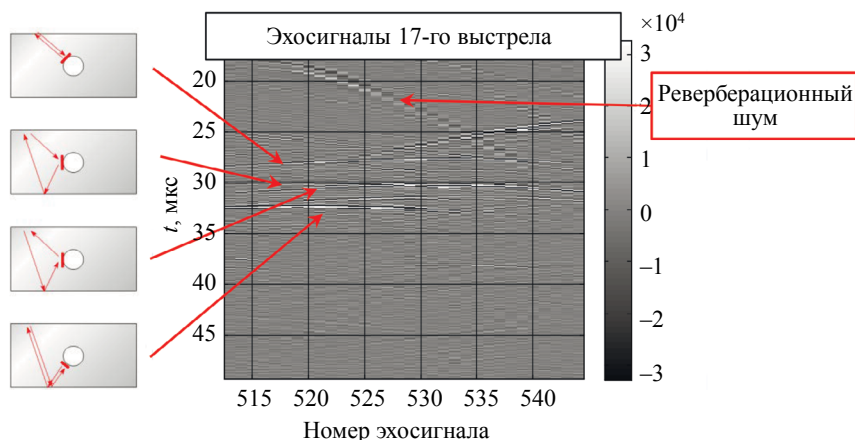


Рис. 9. Эхосигналы 17-го выстрела при коэффициенте усиления 56 дБ.

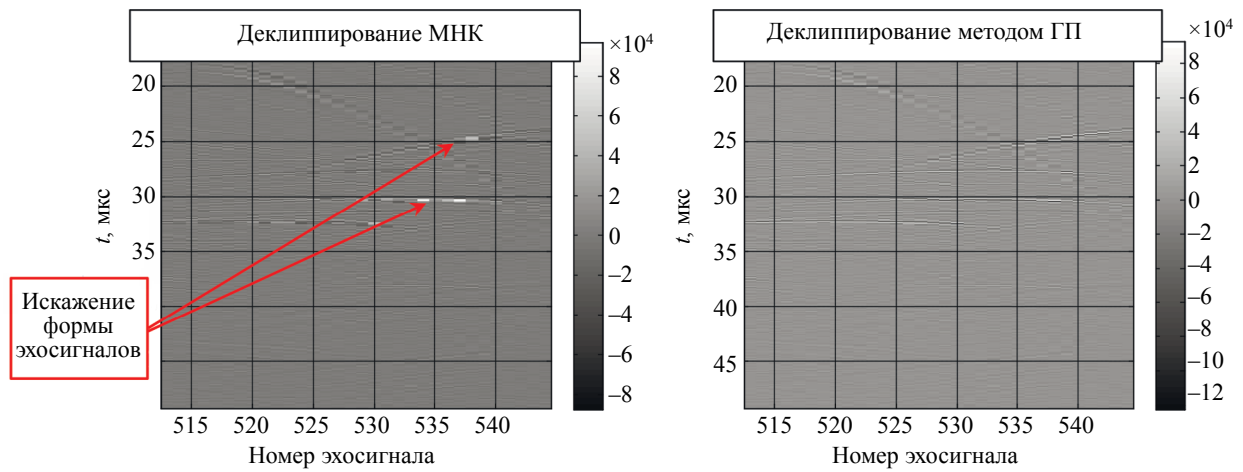


Рис. 10. МНК-эхосигналы (слева) и ГП-эхосигналы (справа) для 17-го выстрела.

На рис. 10 слева показаны МНК-эхосигналы 17-го выстрела (коэффициент усиления 62 дБ) при $m = 2$, а справа — ГП-эхосигналы для полосы частот 1,3; 8 МГц. Уровень отсечки был равен 1300, или 63,5 % от максимального возможного значения эхосигнала. Деклиппирование МНК приводит к искажению формы эхосигнала. Контрастность ГП-эхосигналов уменьшилась, что говорит об увеличении динамического диапазона. Сравнение результатов деклиппирования по формуле (10) приведено в таблице в первой строке. Видно, что максимальное отклонение $\Delta_1^{\text{МНК}}$ в три раза больше, чем $\Delta_1^{\text{ГП}}$, да и среднеквадратичное отклонение $\Delta_2^{\text{МНК}}$ больше на 36 %, чем $\Delta_2^{\text{ГП}}$.

Т а б л и ц а

Влияние параметров деклиппирования на точность расчетов

	Отсечка, %	МНК			Метод Гершберга—Папулиса		
		порядок	$\Delta_1^{\text{МНК}}$	$\Delta_2^{\text{МНК}}$	полоса частот, МГц	$\Delta_1^{\text{ГП}}$	$\Delta_2^{\text{ГП}}$
1	63,5	2	2,39	0,850	(1,30; 8,00)	1,55	0,622
2	31,7	2	2,05	0,924	(1,25; 8,00)	1,50	0,611
3	63,5	3	4,89	1,581	(1,50; 7,50)	1,72	0,639
4	63,5	4	9,26	2,737	(2,00; 7,00)	1,49	0,596
5	63,5	5	15,76	4,259	(2,25; 6,50)	1,29	0,573
6	63,5	6	25,64	6,343			

В таблице приведены значения погрешности Δ_1 и Δ_2 согласно формуле (10) для МНК-эхосигналов в зависимости от порядка m и для ГП-эхосигналов в зависимости от частотного диапазона (f_{\min} , f_{\max}). Увеличение порядка МНК делает значения величин $\Delta_1^{\text{МНК}}$ и $\Delta_2^{\text{МНК}}$ неприемлемо большими и, наоборот, метод Гершберга—Папулиса демонстрирует устойчивую работу в достаточно широком частотном диапазоне.

3.2. Эхосигналы от отверстия диаметром 2 мм в образце Ду800

Следующий модельный эксперимент проводился с локальной иммерсионной ванной в виде акваполимера при контроле образца с четырьмя отверстиями бокового сверления диаметром 3 мм, сделанного из фрагмента трубопровода диаметром 800 мм с толщиной стенки 38 мм. Трубопроводы типа Ду800 широко представлены на объектах атомной энергетики Российской Федерации. Для восстановления формы поверхности образца нужно измерить без искажений эхосигналы от его поверхности [16], а для восстановления изображения отражателей с учетом неровной поверхности необходимо повторить измерения эхосигналов, увеличив коэффициент усиления больше, чем на 20 дБ. Деклиппирование «зашкаленных» эхосигналов должно исключить измерения для двух значений коэффициента усиления, что увеличит в два раза скорость регистрации эхосигналов и уменьшит в два раза их объем.

Эхосигналы регистрировались с помощью антенной решетки (1,8 МГц, 20 элементов, размер пьезоэлемента $1,15 \times 10$ мм, зазор между ними 0,05 мм) на рексолитовой призме с углом наклона 20 градусов. При коэффициенте усиления 0 дБ измерялись эхосигналы от поверхности образца, а при коэффициенте усиления 36 дБ — от отражателей в образце. Частота дискретизации была равна 25 МГц.

Будем анализировать эхосигналы 11-го выстрела. На рис. 11 показаны неискаженные эхосигналы при коэффициенте усиления 0 дБ. При таком усилении амплитуды импульсов, отраженных от отверстий, были малы и представлены в пределах четырех уровней АЦП и визуально были практически не заметны. Поэтому эхосигналы были пропущены через полосовой фильтр с частотным диапазоном 0,8; 4 МГц, после чего они стали вполне различимы.

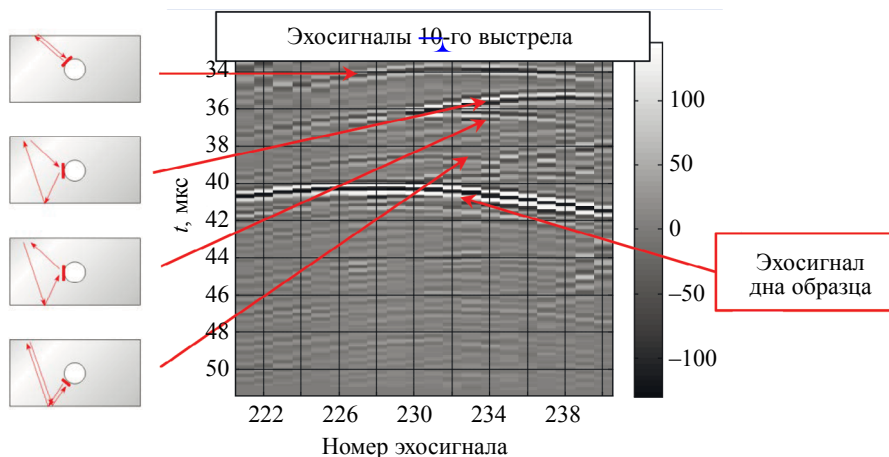


Рис. 11. Эхосигналы 11-го выстрела при коэффициенте усиления 0 дБ.

Так как разрядность АЦП в «Х-32» девять разрядов, то при деклиппировании уровень был равен 100 (78,1 %). На рис. 12 слева показаны МНК-эхосигналы 10-го выстрела при $m = 2$, а справа — ГП-эхосигналы для полосы частот 0,8; 3,5 МГц. Деклиппирование МНК приводит к искажению формы эхосигнала, подобному на рис. 13 слева. Оценка качества деклиппирования эхосигналов МНК ($\Delta_1^{\text{МНК}} = 4,261$, $\Delta_2^{\text{МНК}} = 0,996$) хуже, чем для метода Гершберга—Папулиса ($\Delta_1^{\text{ГП}} = 0,526$, $\Delta_2^{\text{ГП}} = 0,438$).

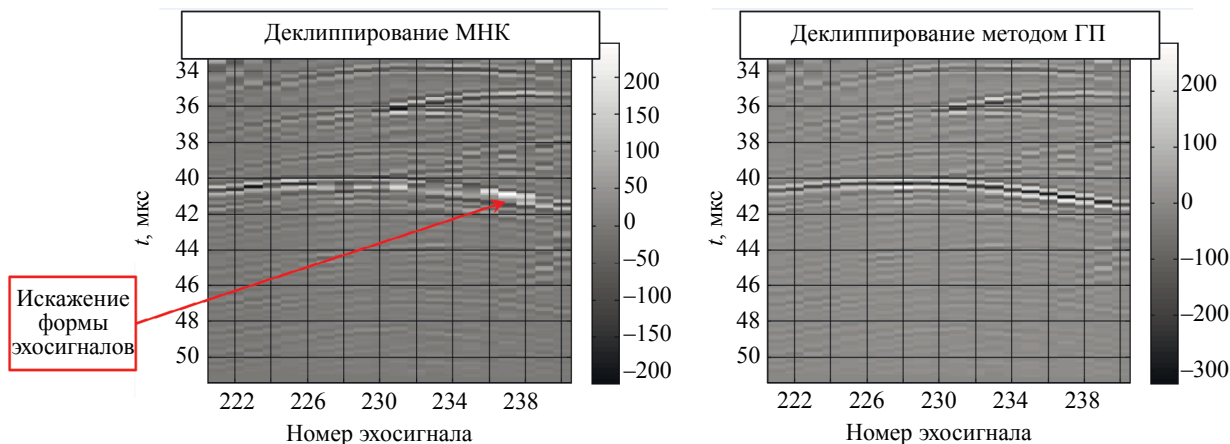


Рис. 12. МНК-эхосигналы (слева) и ГП-эхосигналы (справа) для 10-го выстрела.

На рис. 13 приведены второй (слева) и десятый (справа) эхосигналы 11-го выстрела, измеренные без искажения, и результат деклиппирования двумя способами искаженного сигнала. Как слева, так и справа ГП-эхосигнал близок по форме к неискаженному сигналу. Справа МНК-эхосигнал существенно отличается от неискаженного сигнала.

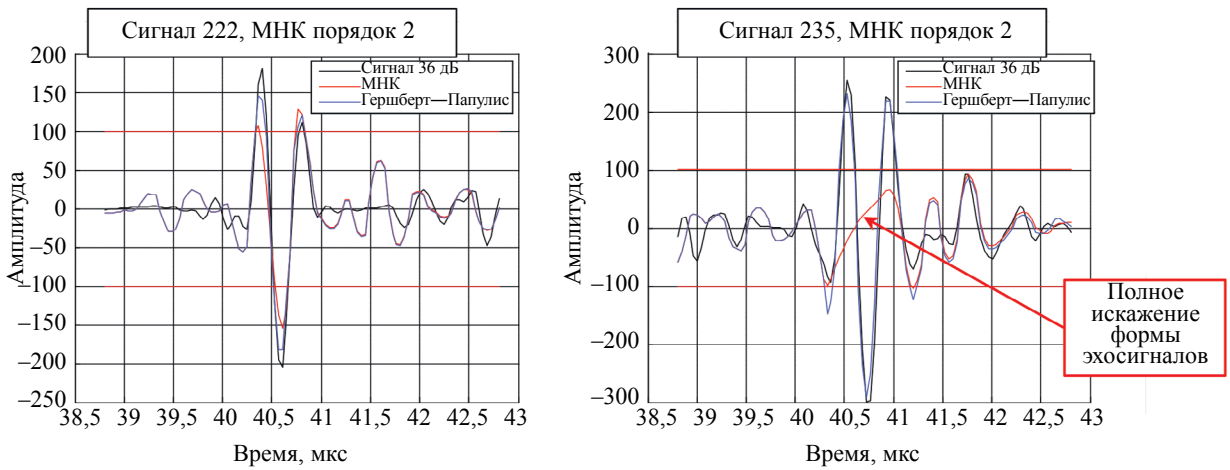


Рис. 13. Второй (слева) и десятый (справа) эхосигналы 11-го выстрела с неискаженным эхосигналом (график черного цвета) и эхосигналами после деклиппирования. Красной горизонтальной линией показан уровень отсечки.

3.3. Образец СО-1

Эхосигналы от отверстий бокового сверления в стандартном образце СО-1 регистрировались с помощью антенной решетки (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор между элементами 0,1 мм). Первое измерение 1 024 эхосигналов от пяти отверстий, для крайних из которых на рис. 14 указана глубина, проводилось без искажений при коэффициенте усиления, равном 40 дБ. При втором измерении коэффициент усиления был равен 80 дБ, что привело к клиппированию эхосигналов. Частота дискретизации была равна 25 МГц.

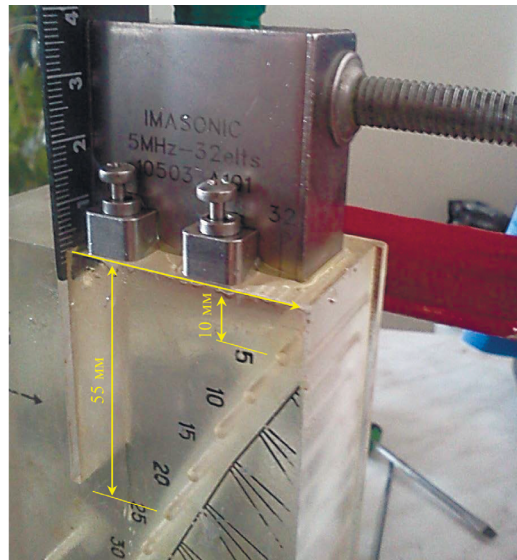


Рис. 14. Измерение эхосигналов в образце СО-1.

Оценка качества деклиппирования проводилась способом, отличающимся от примененного ранее. На ЦФА-изображениях, восстановленных на продольной волне на прямом луче, измерялись амплитуды бликов, соответствующих границам отверстий бокового сверления. Линией черного цвета на рис. 15 показан график полученных при использовании неискаженных эхосигналов (коэффициент усиления 40 дБ). График, показанный линией серого цвета, получен по ЦФА-изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным при коэффициенте усиления 80 дБ. Его максимум сместился на глубину 40 мм. Пунктирной линией черного цвета пока-

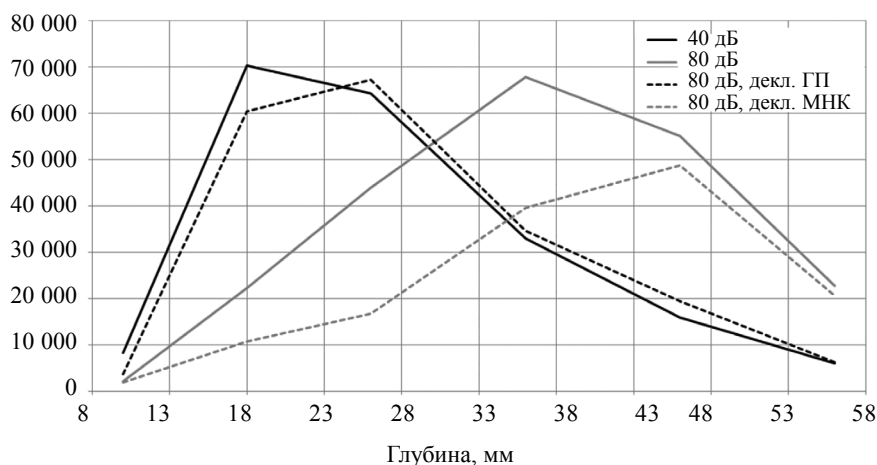


Рис. 15. Амплитуды бликов отверстий бокового сверления на ЦФА-изображениях, восстановленных по разным эхосигналам.

зан график амплитуд бликов, полученный по изображению, восстановленному по ГП-эхосигналам для полосы частот 1; 8 МГц. Видно, что он отличается от графика, полученного по неискаженным эхосигналам (линия черного цвета), меньше, чем на 10 %. Это свидетельствует о том, что ГП-эхосигналы близки к исходным. График амплитуды бликов отверстий бокового сверления, полученный по ЦФА-изображению при использовании МНК-эхосигналов при $m = 2$, показан на графике пунктирной линией серого цвета. Грубая частота дискретизации и малый порядок МНК не позволили эффективно провести процедуру МНК-деклиппирования.

4. СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ

4.1. Скорость деклиппирования

Скорость деклиппирования очень сильно зависит от уровня отсечки. При высоком уровне клиппирования (больше 50 %) методу Гершберга—Папулиса требуется выполнить до сотни итераций по алгоритму и скорость его работы примерно такая же, как и у МНК по формуле (4). Но если уровень клиппирования мал (меньше 10 %), то методу Гершберга—Папулиса требуется около 10 000 итераций и он может оказаться медленнее МНК более, чем в 100 раз. Однако не надо забывать, что результаты деклиппирования методом Гершберга—Папулиса принципиально лучше, чем при использовании МНК (см. рис. 7).

Отметим, что распараллеливание расчетов по эхосигналам с помощью технологии NVIDIA CUDA™ [17] на несколько порядков может ускорить деклиппирование методом Гершберга—Папулиса измеренных эхосигналов. Это объясняется тем, что, во-первых, основная операция метода — это преобразование Фурье, которое можно выполнять по технике быстрого преобразования Фурье. А во-вторых, для деклиппирования каждого эхосигнала требуется память, пропорциональная длине вектора \mathbf{s} . Скромные требования к размерам памяти позволят одновременно обрабатывать несколько десятков сигналов. Деклиппирование МНК также можно проводить с использованием технологии NVIDIA CUDA™, но для обработки каждого эхосигнала нужно памяти пропорционально N_s^2 , что существенно уменьшит количество одновременно деклиппируемых эхосигналов. Правда, надо иметь в виду то обстоятельство, что матрицы в формуле (5) или (6) являются сильно разреженными, для работы с которыми разработаны алгоритмы, требующие существенно меньше памяти, чем N_s^2 .

4.2. Количество параметров метода

В методе наименьших квадратов наличествует только один параметр, который определяет порядок полинома аппроксимации. Проведение модельных экспериментов показало, что при наличии шума деклиппирование МНК относительно устойчиво работает при $m = 2$.

В методе Гершберга—Папулиса нужно задать два параметра — нижнюю f_{\min} и верхнюю f_{\max} частоты спектра сигнала, которые достаточно просто определяются по уровню 10 % от спектра сигнала.

4.3. Поведение алгоритмов при грубом шаге дискретизации (меньше трех отсчетов на период)

При грубом шаге интерполяции, когда на $\{t_{\mp}\}$ -интервале может вообще не оказаться отсчетов, деклиппирование методом Гершберга—Папулиса хорошо показало себя, а МНК может потерять устойчивость.

4.4. Поведение алгоритмов при тщательном шаге дискретизации (больше трех отсчетов на период)

МНК очень хорошо зарекомендовал себя при обработке модельных сигналов при отсутствии шума. Если провести интерполяцию неискаженного сигнала, то можно добиться того, что на всех $\{t_{\mp}\}$ -интервалах будет нужное количество отсчетов. Подобрал порядок m , как описано в разделе 1.1., можно получить практически идеальный результат деклиппирования. Но это возможно при отсутствии шума и при высокой частоте дискретизации так, чтобы было выполнено условие $m = n_{\mp} - 1$! При рабочей частоте антенной решетки 5 МГц частота дискретизации эхосигнала может превысить 200 МГц! Попытки применить традиционные методы интерполяции для повышения частоты дискретизации клиппированного эхосигнала дополнительно искажают его вид, так что рассмотренные в статье методы деклиппирования становятся неэффективными.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При малом количестве отсчетов на $\{t_{\mp}\}$ -интервалах метод Гершберга—Папулиса предпочтительнее, чем МНК (см. рис. 4). Для эффективного применения деклиппирования МНК количество отсчетов на $\{t_{\mp}\}$ -интервалах должно быть не меньше трех, что при низких уровнях отсечки можно достичь при высокой частоте дискретизации сигнала (более 200 МГц при работе с частотой 5 МГц).

2. При высокой частоте дискретизации сигнала, когда на каждый $\{t_{\mp}\}$ -интервал приходится больше трех отсчетов, МНК может дать очень точный результат деклиппирования при порядке $m > 3$. Но это возможно при отсутствии шума и с такой частотой дискретизации, чтобы выполнялось равенство $m = n_{\mp} - 1$.

3. Деклиппирование эхосигналов по регуляризованному алгоритму RBAR по формуле для случая, когда целевые значения I_{+} и I_{-} определялись уровнем отсечки, не дало интересного результата. Проблема деклиппирования методом RBAR порождает новую проблему — проблему оценки целевых значений I_{+} и I_{-} !

4. В проведенных модельных экспериментах метод Гершберга—Папулиса по формуле и с условием показал большую эффективность, чем МНК по формуле (см. рис. 4).

Автор выражает благодарность сотрудникам «Научно-производственного центра «ЭХО+» А.Е. Базулину и С.А. Коколеву за инициализацию работы по деклиппированию эхосигналов.

ООО «НПЦ «ЭХО+»
Москва

Поступила в редакцию
1 марта 2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Janssen A., Veldhuis R., Vries L. Adaptive interpolation of discrete-time signals that can be modeled as autoregressive processes. — IEEE Trans. on Acoust., Speech and Signal Processing, 1986, No. 4, p. 317—330.

2. Miura S., Nakajima H., Miyabe S., Makino S., Yamada T., Nakadai K. Restoration of clipped audio signal using recursive vector projection. — TENCON, 2011, No.11, p. 394—397. DOI: 10.1109/TENCON.2011.6129132

3. Kitic S., Jacques L., Madhu N., Hopwood M., Spriet A., De Vleeschouwer C. Consistent iterative hard thresholding for signal declipping. — IEEE Int. Conf. on Acoust., Speech and Signal Processing, 2013, No. 5. DOI: 10.1109/ICASSP.2013.6638804

4. Adler A., Emiya V., Jafari M., Elad M., Gribonval R., Plumbley M. Audio Inpainting. — IEEE Trans. on Acoust., Speech and Signal Processing, 2012, No. 4, p. 922—932.
5. Defraene B., Mansour N., De Hertogh S., van Waterschoot T., Diehl M., Moonen M. Declipping of audio signals using perceptual compressed sensing. — IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2013, v. 21, No. 12, p. 2627—2637. DOI: 10.1109/TASL.2013.2281570
6. Selesnick I. Least Squares with Examples in Signal Processing. URL: <http://cnx.org/content/m46131/1.1/> (дата обращения: 29.12.2016).
7. Bottcher A., Grudsky S. M. Toeplitz Matrices, Asymptotic Linear Algebra, and Functional Analysis. — Birkhauser, 2000. — 121 p.
8. Harvilla M. J., Stern R. M. Efficient audio declipping using regularized least squares. URL: http://www.cs.cmu.edu/~mharvill/papers/rbar_paper_final.pdf. (дата обращения: 29.12.2016)
9. Алёшин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х., Вошанов А. К., Ермолов И. Н., Гурвич А. К. Методы акустического контроля металлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
10. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
11. Базулин Е. Г. Повышение продольного разрешения акустических систем визуализации неоднородностей при экстраполяции спектров эхоимпульсов. — Акустический журнал, 1993, т. 39, № 1, с. 19—24.
12. Сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 29.12.2016).
13. Базулин Е. Г., Вopilкин А. Х., Тихонов Д. С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Ч. 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками. — Контроль. Диагностика, 2015, № 8, с. 7—22.
14. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. Учеб. пособие для вузов. — М.: Наука, 1989. — 432 с.
15. ФАР-дефектоскоп «Х-32». URL: <http://www.harfang.ru/content/x-32.html> (дата обращения: 29.12.2016)
16. Базулин А. Е., Базулин Е. Г. Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью. — Дефектоскопия, 2014, № 7, с. 3—11.
17. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (дата обращения: 29.12.2016).