

УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЭХОСИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

© 2020 г. В.К. Авагян¹, Е.Г. Базулин^{1,*}

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,
Технопарк «Строгино»

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 16.07.2020; после доработки 31.08.2020

Принята к публикации 11.09.2020

Недостатком использования метода цифровой фокусировки антенны (ЦФА) для получения изображения отражателей является большой объем эхосигналов и недостаточно высокая скорость их регистрации. Для ее повышения предлагается одновременно всеми элементами антенной решетки (АР) излучать зондирующие импульсы, сформированные по наборам кодовых последовательностей, используемых в технологии Code Division Multiple Access (CDMA). Измеренные эхосигналы можно декодировать с помощью согласованной фильтрации (СФ) и восстановить изображение отражателей методом комбинированного SAFT (C-SAFT). Восстановить изображение без декодирования измеренных эхосигналов можно методом МЭ. Предложенная технология была испытана для получения изображений отражателей в образцах из дюралюминия, стали 20 и стали 40.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной, метод максимальной энтропии, Code Division Multiple Access.

DOI: 10.31857/S0130308220110019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике ультразвукового контроля (УЗК) широко применяются дефектоскопы, использующие антенные решетки (АР). Для визуализации внутреннего объема объектов контроля (ОК), как правило, применяются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [1], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. В статье [3], посвященной сравнению возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов, сделан вывод, что ЦФА-технология более перспективна с алгоритмической точки зрения, но обладает таким недостатком, как большой объем регистрируемых эхосигналов, число которых пропорционально квадрату числа элементов АР. Передача эхосигналов от блока измерения в управляющий компьютер может потребовать много времени, что приводит к снижению скорости регистрации. Данное обстоятельство может оказаться критичным для проведения контроля на ряде объектов, и поэтому задача увеличения скорости регистрации эхосигналов в режиме ЦФА является актуальной.

Еще одна область ультразвукового контроля, где скорость регистрации эхосигналов очень важна, — это медицинская диагностика, так как для получения качественного изображения внутренних органов, находящихся в постоянном движении, требуется предельно уменьшить время регистрации эхосигналов. В медицине для визуализации используются АР, состоящие более чем из сотни элементов. Для получения ФАР-изображения в виде S-скана нужно сфокусировать луч для двухсот и более углов, на что может понадобиться время, соизмеримое с характерным временем смещений внутренних органов. В результате получить их качественное изображение не удастся. Регистрация эхосигналов в режиме двойного сканирования позволит сократить время получения ЦФА-изображения в несколько раз, но и этого может оказаться недостаточно для качественной визуализации движущихся объектов [4]. Это еще раз подтверждает актуальность решаемой задачи.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Методы регистрации эхосигналов и восстановления изображения

Рассмотрим принцип работы ЦФА-дефектоскопа. На первом этапе эхосигналы измеряются при излучении и приеме всеми комбинациями пар элементов антенной решетки [5]. В статье [6] такой режим регистрации эхосигналов называется режимом двойного сканирования, а в статье [7] — режимом Full Matrix Capture (FMC).

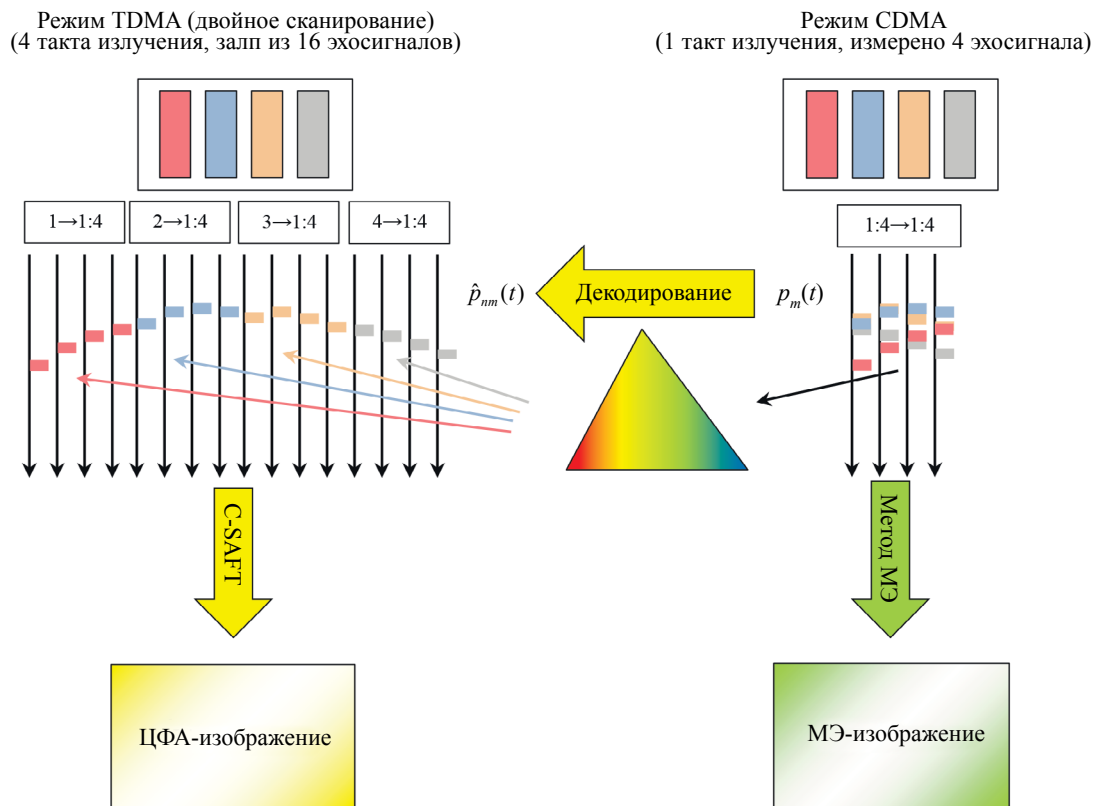


Рис. 1. Схематическое представление регистрации в режиме двойного сканирования и CDMA.

Порядок регистрации эхосигналов определяется коммутационной матрицей $\mathbf{C}$ размерами $N_e \times N_e$, где N_e — число элементов АР. Если все элементы коммутационной матрицы $\mathbf{C}$ равны единице, то за N_e излучений зондирующего импульса каждым элементом будет измерено $N_e \times N_e$ эхосигналов. Для наглядности рассмотрим АР, состоящую из $N_e = 4$ элементов, каждому элементу присвоим свой цвет, совпадающий с цветом эхосигналов при излучении и приеме (рис. 1, слева).

Сначала первый элемент АР излучает зондирующий сигнал, а отраженные эхосигналы регистрируются всеми элементами (прямоугольники красного цвета). Далее излучение производит второй, а прием вновь осуществляется всеми элементами АР (прямоугольники синего цвета), и так до тех пор, пока все элементы не осуществят свои выстрелы. С точки зрения теории многоканальной связи, регистрация в режиме двойного сканирования подобна ситуации, когда абоненты по очереди посылают сообщения, которые принимаются всеми абонентами. Последовательный характер излучения зондирующего импульса позволяет ответить на вопрос: «От какого источника было получено сообщение?» Такой режим связи называется множественным доступом с разделением каналов по времени (в англоязычной литературе — Time Division Multiple Access (TDMA)). Режим регистрации эхосигналов, когда АР, работающая в режиме двойного сканирования, механически перемещается, называется режимом тройного сканирования [6]. Когерентное объединение парциальных изображений для всех положений АР позволяет повысить фронтальную разрешающую способность объединенного изображения, а также снизить уровень белого шума.

На втором этапе работы в режиме ЦФА по измеренным эхосигналам восстанавливается изображение отражателей методом Combined Synthetic Aperture Focusing Technique (C-SAFT) [5, 8], который можно модифицировать для учета многолучевого распространения ультразвука в ОК с неровными границами и при наличии областей с разными акустическими свойствами [9]. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется Total Focusing Method (TFM) [7]. Изображения, полученные в режиме двойного сканирования, будем называть ЦФА-изображениями, а в режиме тройного сканирования — ЦФА-Х-изображениями.

2.2. Методы ускорения регистрации эхосигналов

2.2.1. Прореживание коммутационной матрицы

Простейшим способом уменьшения объема регистрируемых эхосигналов является прореживание коммутационной матрицы C . Заполнив единицами только нижний или верхний треугольник матрицы C , можно примерно вдвое уменьшить объем измеренных эхосигналов, но добиться повышения скорости регистрации не удастся. Такая матрица называется Half Matrix Capture (HMC) и используется, например, в приборе A1550 IntroVisor компании ООО «АКС» [10]. Также матрицу коммутации C можно проредить случайным образом более чем в 2 раза, но такой подход приведет к повышению уровня шума в восстановленном ЦФА-изображении. Можно воспользоваться специальной методикой прореживания C , которая описана в патенте [11]. Однако при увеличении числа нулевых элементов матрицы C более чем на 70 % повышается общий уровень шума и заметно искажается форма блика.

2.2.2. Излучение набора плоских волн

Для повышения скорости регистрации эхосигналов в медицинской диагностике [12] разработан метод излучения набора плоских волн (Plane Wave Image (PWI)). Излучение около десяти плоских волн под разными углами позволяет получать изображения с высоким отношением сигнал/шум и высокой фронтальной разрешающей способностью как у ЦФА-изображений. Применение такого метода для АР, состоящих из 32 элементов, позволяет повысить скорость регистрации в 1,5—2 раза. Особенно эффективно применение метода PWI для АР, состоящих из 64 и более элементов. В этом случае скорость регистрации эхосигналов без потери качества изображения отражателей можно повысить более чем в три раза.

2.2.3. Применение технологии CDMA

Для уменьшения времени регистрации эхосигналов АР, работающей в режиме двойного сканирования, можно излучать одновременно всеми элементами АР сложные фазоманипулированные сигналы, сформированные на основе наборов специальных кодовых последовательностей, разработанных для технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов связи (в англоязычной литературе — Code Division Multiple Access (CDMA)). В идеальном случае ЦФА-изображение отражателей можно получить по эхосигналам, измеренным за один такт, а не за N_e , как в режиме двойного сканирования.

В технологии CDMA используются кодовые последовательности Касами (Kasami) [13], Голда (Gold) [14], де Брейна (de Bruijn) [15], Задова—Чу (Zadoff—Chu) [16]. Элемент [13] кодовой последовательности называется чипом, и число чипов N_e характеризует длину кодовой последовательности. На основе кодовых наборов генерируются фазоманипулированные зондирующие сигналы $s_n(t)$ для возбуждения элементов АР. Для эффективного декодирования корреляционная функция $R_{nm}(\tau)$ набора сигналов $s_n(t)$, предназначенных для возбуждения элементов антенной решетки, должна обладать следующим свойством:

$$R_{nm}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_n(t) s_m(t + \tau) dt = \delta_{nm} \delta(\tau), \quad n, m = 1, 2, \dots, N_e, \quad (1)$$

где δ_{nm} — символ Кронекера. Набор сигналов, обладающий свойством (1), называется ортогональным. На рис. 2а в растровом виде показаны корреляционные функции набора из 16 ортогональных кодовых последовательностей для восьмой последовательности $s_8(t)$. Пунктирной линией желтого цвета показана функция взаимной корреляции (ФВК) кодовой последовательности под номером восемь с кодовой последовательностью под номером четыре, которая для ортогональных сигналов равна нулю. Сплошной линией представлена функция автокорреляции (ФАК) восьмой кодовой последовательности, которая в идеальном случае равна δ -функции. На практике сигналов, обладающих такими свойствами, не существует. Используемые в технологии CDMA наборы кодовых последовательностей, которые в той или иной степени приближаются к идеальному набору со свойством (1), называются псевдоортогональными. На рис. 2б представлена корреляционная характеристика набора, состоящего из 16 сигналов кодовых последовательностей Касами, длиной $N_e = 63$ чипа. На ФАК наблюдаются «боковые лепестки», уровень которых равен примерно –10 дБ, а на ФВК присутствуют межканальные помехи уровня 12 дБ, которые возникают из-за сигналов соседних каналов.

Принцип работы дефектоскопа в режиме CDMA поясняется на рис. 1, справа. Излучение и регистрация эхосигналов выполняются за один такт. При этом каждый элемент АР излучает свой уни-

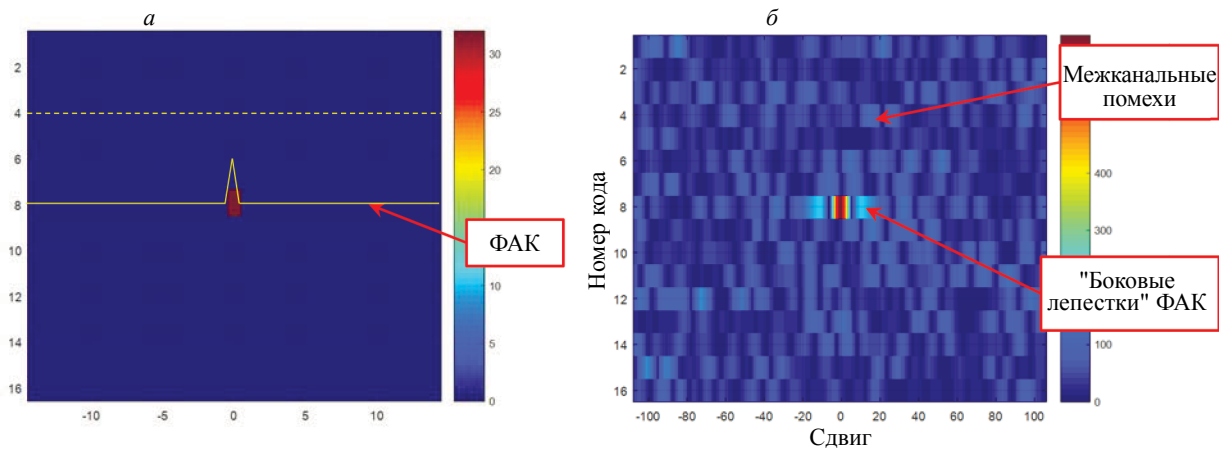


Рис. 2. Корреляционная характеристика сигналов кодового набора, обладающего свойством ортогональности (а), и кодового набора Касами. длиной 63 чипа (б).

кальный сложный сигнал, сформированный с помощью псевдоортогональной кодовой последовательности. Чем больше число элементов АР, тем больше выигрыш в скорости регистрации и объеме данных в сравнении с режимом двойного сканирования, однако при этом возрастает уровень межканальных помех.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ В РЕЖИМЕ CDMA

Восстановить изображение отражателей по зарегистрированной сумме сложных сигналов $p_m(t)$ можно двумя способами. Первый способ (см. рис. 1, желтая стрелка) заключается в декодировании суммы сложных сигналов $p_m(t)$ методом согласованной фильтрации (СФ) или методом максимальной энтропии (МЭ). Это позволяет из зарегистрированной суммы эхосигналов $p_m(t)$ выделить сообщение $\hat{p}_{nm}(t)$, то есть получить оценку эхосигналов, как если бы регистрация проводилась в режиме двойного сканирования и восстановить ЦФА-изображение отражателей по декодированному эхосигналу $\hat{p}_{nm}(t)$.

Второй способ (рис. 1, стрелка зеленого цвета) заключается в восстановлении изображения отражателей с применением нелинейного метода МЭ без операции декодирования суммы сложных сигналов $p_m(t)$.

3.1. Декодирование эхосигналов и восстановление изображений методом ЦФА

Одним из методов декодирования $p_m(t)$ является его сжатие с кодовым сигналом $s_n(t)$ методом СФ [17]. Такой алгоритм сжатия обладает высоким быстродействием и позволяет получать изображения с частотой более 10 Гц, но он не обеспечивает низкий уровень межканальных помех, и эффект сверхразрешения не достигается.

Более сложный метод декодирования простых или сложных сигналов основан на использовании метода МЭ [18, 19]. За счет нелинейности алгоритма можно получать изображения со сверхразрешением. Недостатком метода является долгое время постобработки эхосигналов.

Метод разделения суммы сигналов на аддитивные подкомпоненты заключается в анализе независимых компонент (МНК) в предположении, что подкомпоненты являются негауссовыми сигналами и что они статистически независимы друг от друга. Так как метод МНК позволяет выделить для каждого принимающего абонента только одно «сообщение» из суммы статистически независимых «сообщений», то он не подходит для декорреляции эхосигнала $p_m(t)$, поскольку число «сообщений» одинаковой формы, но с разной амплитудой и задержками при регистрации эхосигналов будет определяться количеством отражателей, число которых, как правило, будет больше единицы.

3.2. Методы уменьшения уровня «боковых лепестков» и межканального шума

Уровень «боковых лепестков» ФАК и уровень межканального шума при излучении эхосигналов в режиме CDMA и при линейном декодировании можно оценить как $1/\sqrt{N_c}$ [17]. При восста-

новлении ЦФА-изображения «боковые лепестки» ФАК приводят к возникновению ложных бликов, искажающих форму блика отражателя. Уровень «боковых лепестков» и уровень межканальных помех на ЦФА-изображении будем оценивать как отношение амплитуды главного максимума к амплитуде второго максимума изображения SNR_{12} . Отношение сигнал/шум изображения, оцениваемое как отношение амплитуды главного максимума к среднему значению изображения, обозначим SNR_{σ} .

В табл. 1 перечислены методы уменьшения уровня «боковых лепестков», выигрыш при их использовании и их недостатки. Увеличивая длину кодовой последовательности N_c , можно добиться желаемого уровня «боковых лепестков», но выбор длины ограничен толщиной ОК из-за «мертвой зоны» АР на призме.

Таблица 1

Методы уменьшения уровня «боковых лепестков» ФАК для режима TDMA

№	Параметр	Уровень «боковых лепестков»	Недостатки предложенных методов
1	Одна кодовая последовательность	$1/\sqrt{N_c}$	Выбор N_c ограничен толщиной ОК из-за «мертвой зоны»
2	N_e кодовых последовательностей	$1/\sqrt{N_c N_e}$	

Если регистрировать эхосигналы в режиме TDMA, излучая каждым элементом АР свой уникальный сигнал кодовой последовательности, то уровень «боковых лепестков» в восстановленном ЦФА-изображении можно оценить как $1/\sqrt{N_c N_e}$. Связано это с тем, что «боковые лепестки» функции корреляции эхосигналов кодовых последовательностей при формировании изображения складываются не когерентно.

Уровень межканальных помех при корреляционной обработке можно оценить по формуле:

$$k \sqrt{\frac{N_e - 1}{N_c}} = L_n, \quad (2)$$

где k — коэффициент, значения которого для разных типов последовательностей приведены в работе [17].

В табл. 2 перечислены некоторые методы уменьшения уровня межканальных помех, выигрыш при их использовании и их недостатки. Если разбить АР на N_{sub} подрешеток, для того чтобы в единый момент времени излучение и прием осуществлялись меньшим числом элементов АР, то, согласно формуле (2), это приведет к уменьшению уровня межканальных помех примерно на $\sqrt{N_{\text{sub}}}$. К сожалению, такой подход приведет к снижению скорости регистрации эхосигналов в N_{sub} раз.

Таблица 2

Методы уменьшения уровня межканальных помех изображения

№		Уровень межканальных помех	Недостатки предложенных методов
1	Разбиение АР на N_{sub} подрешеток	$1/\sqrt{N_{\text{sub}} N_c}$	Понижение скорости регистрации эхосигналов в $N_{\text{sub}} \times N_{\text{sub}}$
2	Применение сплит-сигналов	$1/\sqrt{N_c N_{\text{split}}}$	Понижение скорости регистрации эхосигналов в N_{split}
3	ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ	$1/\sqrt{N_c N_w}$	Необходимость иметь N_w кодовых наборов

Для уменьшения уровня межканальных помех можно воспользоваться сплит-сигналами [20]. Как было сказано выше, выбор длины кодовой последовательности N_c ограничен толщиной ОК. Данный метод позволяет дополнительно снизить уровень межканальных помех в $\sqrt{N_{\text{split}}}$ раз, где N_{split} — число сигналов в сплит-сигнале. Например, вместо использования наборов кодовых после-

довательностей длиной $N_c = 63$, можно 4 раза излучить сигналы длиной $N_c = 15$. Скорости регистрации эхосигналов при использовании сплит-сигналов снижается в N_{split} раз.

Если же в режиме тройного сканирования использовать в каждом положении АР свой набор уникальных кодовых последовательностей, то при когерентном объединении парциальных ЦФА-изображений всех положений АР можно снизить уровень межканальных помех в $\sqrt{N_w}$ раз, где N_w — количество положений АР, но для этого необходимо иметь N_w наборов уникальных кодовых последовательностей, каждый из которых обладает свойством псевдоортогональности. Объединять ЦФА-изображения можно разными способами, в данной статье ЦФА-Х-изображение получалось в результате когерентного сложения парциальных ЦФА-изображений. Для объединения парциальных ЦФА-изображений применялась операция попиксельного поиска медианы с отсечкой амплитуды каждого ЦФА-изображения по уровню, равному матожиданию парциально-го ЦФА-изображения.

Подводя итоги, можно сказать, что для получения изображения с уровнем межканального шума менее -20 дБ необходимо, чтобы через каждый элемент АР проходило более 100 чипов. Для этого можно воспользоваться разными комбинациями предложенных методов, приведенных выше. Следует отметить, что для качественного декодирования сообщений в технологии CDMA, применяемой в сотовой связи, используются сигналы длиной 32 000 чипов, в то время как в нашем случае имеются ограничения в выборе длины сигнала (от 15 до 255 чипов).

3.3. Метод МЭ без декодирования сигналов

Восстановить изображение отражателей в ОК можно, воспользовавшись методом МЭ без декодирования эхосигналов. В работах [21, 22] предложено использовать такой подход (см. рис. 1, зеленая стрелка) для восстановления изображения отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме двойного или тройного сканирования с использованием прореженной коммутационной матрицы C . Нелинейность метода МЭ позволяет дополнительно уменьшить объем измеренных эхосигналов. Используя около 10 % эхосигналов полного набора, удастся восстанавливать изображения отражателей с высокой разрешающей способностью и низким уровнем шума. Если в качестве исходных данных использовать не прореженные эхосигналы $p_{nm}(t)$, а суммарные эхосигналы $p_{nm}(t)$, то метод МЭ позволит получить изображения отражателей с продольным и фронтальным сверхразрешением и низким уровнем шума, обусловленным грубым шагом между излучающим и приемным элементами антенной решетки.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов в режиме двойного и тройного сканирования использовался дефектоскоп «АВГУР-АРТ», разработанный и изготовленный в Научно-производственном центре «ЭХО+» [23]. Регистрация эхосигналов проводилась в режиме TDMA, а режим CDMA эмулировался сложением эхосигналов всех выстрелов. В качестве зондирующих импульсов использовались:

простой сигнал длиной в один период;

набор фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 15 чипов (далее Касами-15). Несущая частота чипа изменялась в диапазоне от 2 до 5 МГц, как в технологии FH-CDMA [24];

четыре набора фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 15 чипов, используемые как сплит-сигнал (далее Касами-15×4). Несущая частота чипа изменялась в диапазоне от 2 до 5 МГц;

набор фазоманипулированных сигналов согласно кодовой последовательности Касами длиной 63 чипов (далее Касами-63). Несущая частота каждого чипа равна 5 МГц.

Если время регистрации и объем эхосигналов удастся сократить как минимум в 8 раз и получить высококачественное изображение ($SNR_{12} > 20$ дБ), то поставленную задачу будем считать решенной.

4.1. Выбор кодовых комбинаций

Оптимальные зондирующие сигналы были выбраны следующим образом. Для последовательностей Касами-15 и Касами-63 генерировались $N_w = 100$ кодовых наборов $\left\{ \left\{ s_{n,w}(t) \right\}_{n=1}^{N_e} \right\}_{w=1}^{N_w}$, в каждом из которых было по $N_e = 32$ зондирующих сигнала. Затем рассчитывались эхосигналы

$p_{n,m}(t; s(t))$ от точечного отражателя в предположении, что излучение и прием происходят точечными элементами АР. Из 100 кодовых наборов отбиралось только 20, ЦФА-изображения которых имели наивысший уровень SNR_{12} .

4.2. Регистрация в режиме тройного сканирования

4.2.1. Образец «тест перерасеивания» из дюралюминия

В дюралюминиевом образце толщиной 90 мм было сделано двенадцать боковых отверстий (БЦО) диаметром 0,5 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор 0,1 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму. На рис. 3 приведено схематическое изображение образца и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в $N_w = 20$ положениях с шагом 4 мм. Для каждого положения использовался свой набор кодовых сигналов (см. раздел 3.2). АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого — в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Квадратом красного цвета выделена область восстановления ЦФА-изображения (ОВИ).

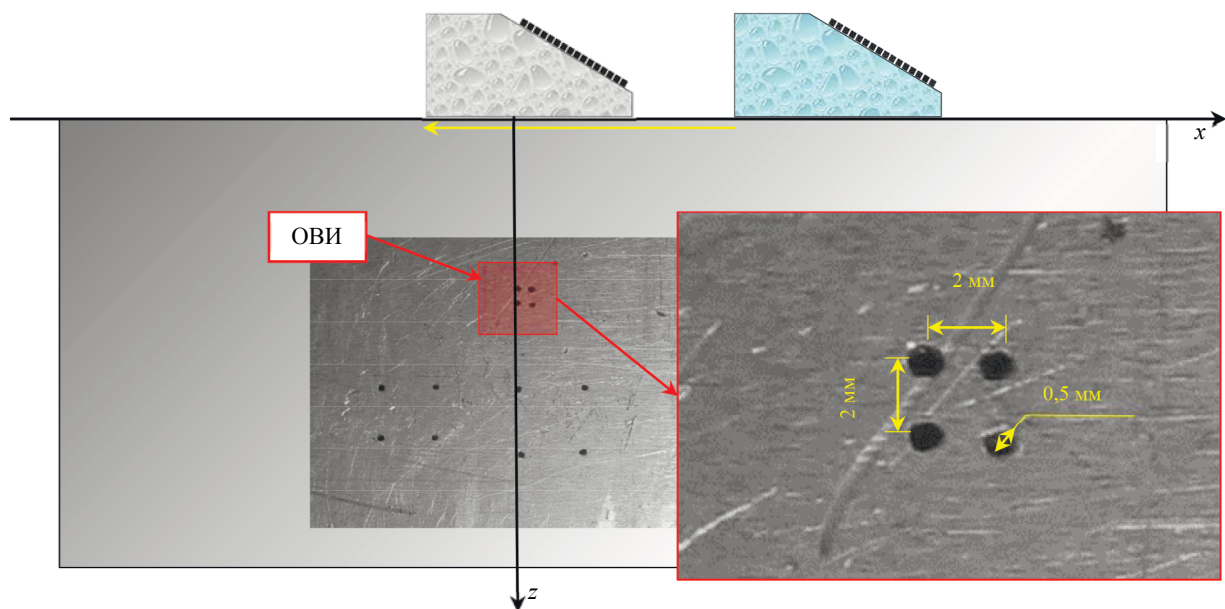


Рис. 3. Схематическое изображение образца «тест перерасеивания» из дюралюминия и области сканирования.

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходит на поперечной волне. На рис. 4а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при излучении простого сигнала в режиме TDMA. Блики границ БЦО различимы, но на изображении присутствуют ложные блики, связанные с эффектом перерасеивания импульсов между БЦО и эффектом возникновения волны обегания-соскальзывания, которые не позволяют уверенно решить даже задачу определения количества отражателей. При регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования межканальные помехи отсутствуют. ЦФА-Х-изображение на рис. 4а будем считать эталонным. Время и объем эхосигналов при регистрации их в режиме тройного сканирования будем полагать равными 100 %. При оценке времени регистрации не учитывается время, необходимое для работы системы сканирования.

На рис. 4б показано ЦФА-Х-изображение, полученное при сложении двадцати парциальных ЦФА-изображений при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA. Декодирование суммы сложных сигналов проводилось методом СФ. Для получения данного изображения потребовалось всего 3 % времени и 3 % объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования. К сожалению, значение $SNR_{12} = 14$ дБ не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным. Если те же парциальные ЦФА-изображения объединить как медиану с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания (рис. 4в), то SNR_{12} удастся повысить на 4 дБ, однако и в этом случае изображение нельзя считать высококачественным.

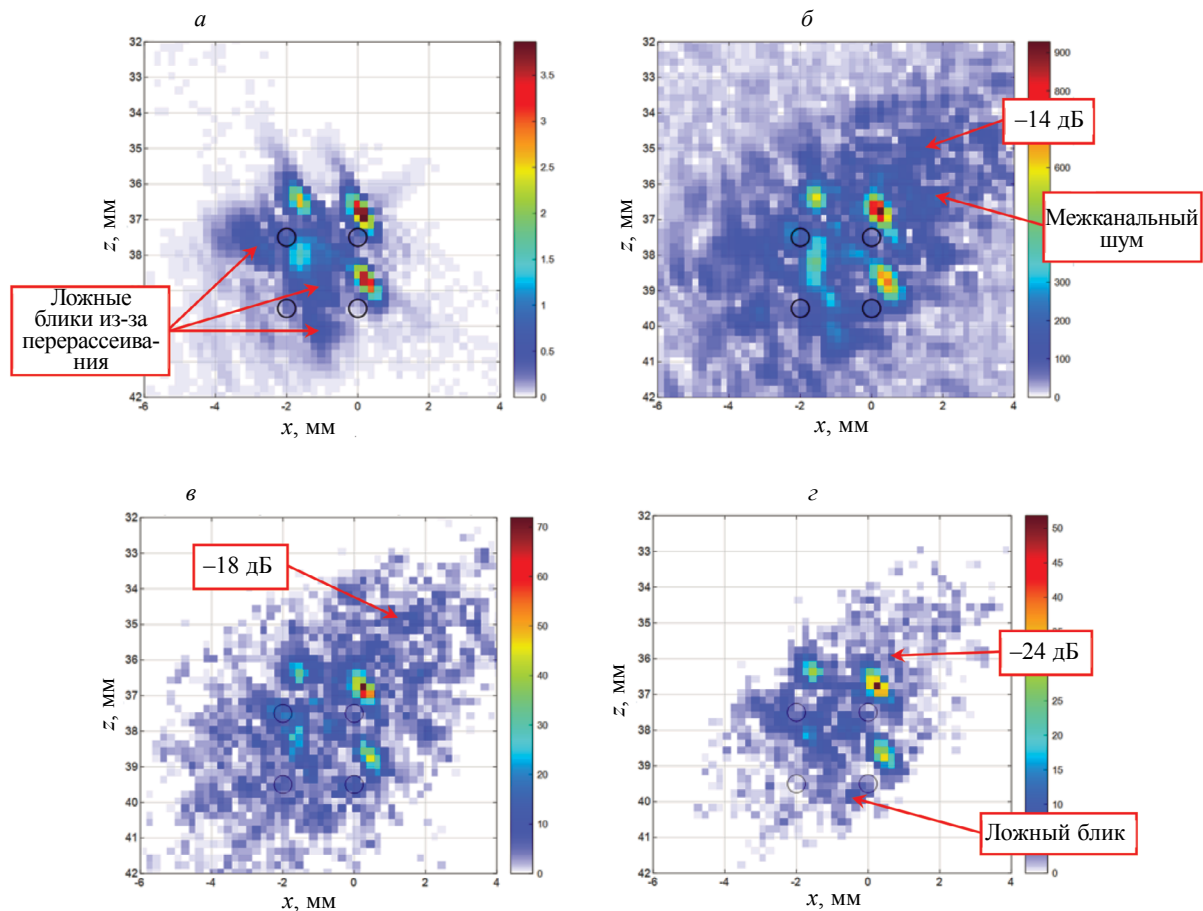


Рис. 4. ЦФА-Х-изображение при излучении:

a — простого сигнала, режим TDMA; b — Касами-15, режим CDMA, СФ, сумма 20; v — Касами-15, режим CDMA, СФ, медиана 20; z — Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 80.

При излучении сплит-сигналов Касами-15×4 в режиме CDMA и объединении восьмидесяти ЦФА-изображений как медианы с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания можно получить ЦФА-Х-изображение (рис. 4 z), удовлетворяющее условию высококачественного изображения ($SNR_{12} = 24$ дБ). Время регистрации составит 12 % от требуемого для режима тройного сканирования (см. рис. 4 a), а объем эхосигналов уменьшится до 12 %.

Несмотря на то, что поставленную задачу удалось решить, на рис. 5 показано изображение, полученное методом МЭ без декодирования эхосигналов (см. раздел 3.3) для четырех положений

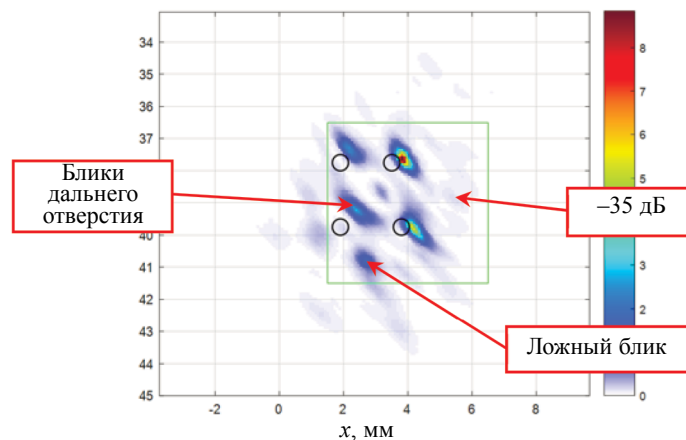


Рис. 5. МЭ-изображение, Касами-15, четыре положения АР.

АР. Уровень бликов межканального шума уменьшился примерно до -35 дБ, а амплитуда многих бликов, сформированных при перерассеивании импульсов на БЦО и трансформации типа волны, уменьшилась на 10 дБ. Однако на МЭ-изображении присутствует ложный блик большой амплитуды, сформированный перерассеянными на БЦО импульсами. Этот же ложный блик есть и на изображении рис. 4, и его наличие на обоих изображениях связано с тем, что метод ЦФА и метод МЭ не учитывают такой эффект, как перерассеивание импульсов между отражателями. При сравнении с режимом тройного сканирования для регистрации 0,2 % эхосигналов было затрачено всего 0,5 % времени. Отметим, что разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в 2 раза по сравнению с изображением на рис. 4г.

Необходимо отметить, что образец обладал слабой анизотропией, что учитывалось при восстановлении изображений БЦО [9].

4.2.2. Образец из стали 20 с одиннадцатью БЦО

В образце толщиной 90 мм, изготовленном из стали 20, было просверлено одиннадцать сквозных БЦО диаметром 2 мм, расположенных равномерно на глубине от 5 до 85 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,75 \times 10$ мм, зазор 0,25 мм), установленной на рексолитовую 35-градусную призму. На рис. 6 приведено схематическое изображение образца и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в $N_w = 20$ положениях с шагом 3,74 мм. АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого — в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Квадратом красного цвета выделена часть ОВИ.

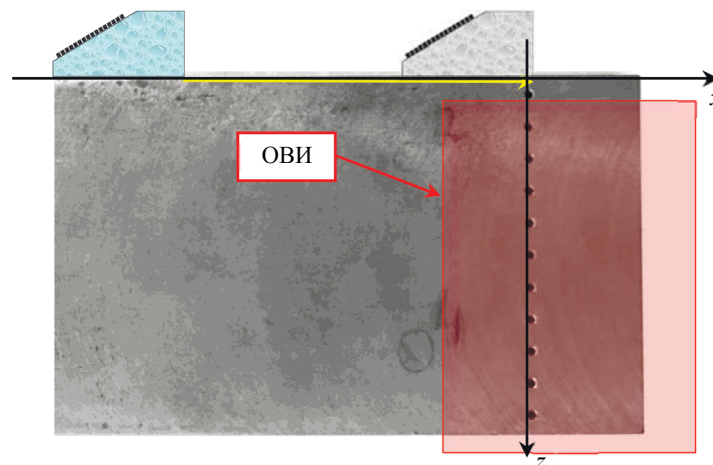


Рис. 6. Фотография образца толщиной 90 мм из стали 20 и схематическое изображение области сканирования.

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходят на поперечной волне. На рис. 7а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при излучении простого сигнала в режиме TDMA. На изображение нанесена маска образца. Различимы блики границ десяти БЦО и блик угла образца на прямом луче. Время, требуемое для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования, и их объем для дальнейшего сравнения будем полагать равным 100 %. Для получения ЦФА-Х-изображения при сложении двадцати парциальных ЦФА-изображений, восстановленных при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA, требуется всего 3 % времени и объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования. Однако значение $SNR_{12} = 7$ дБ не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным. Использование сплит-сигналов Касами-15 $\times$ 4 в режиме CDMA при когерентном суммировании восьмидесяти парциальных ЦФА-изображений позволило получить $SNR_{12} = 11$ дБ, что снова не удовлетворяет критерию высококачественного изображения. Если же восемьдесят парциальных ЦФА-изображений объединить как медиану с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания, то снова SNR_{12} удастся повысить незначительно — только до 13 дБ (рис. 7б), что, к сожалению, не позволяет считать изображение высококачественным. Высокий уровень межканальных помех связан с тем, что самые

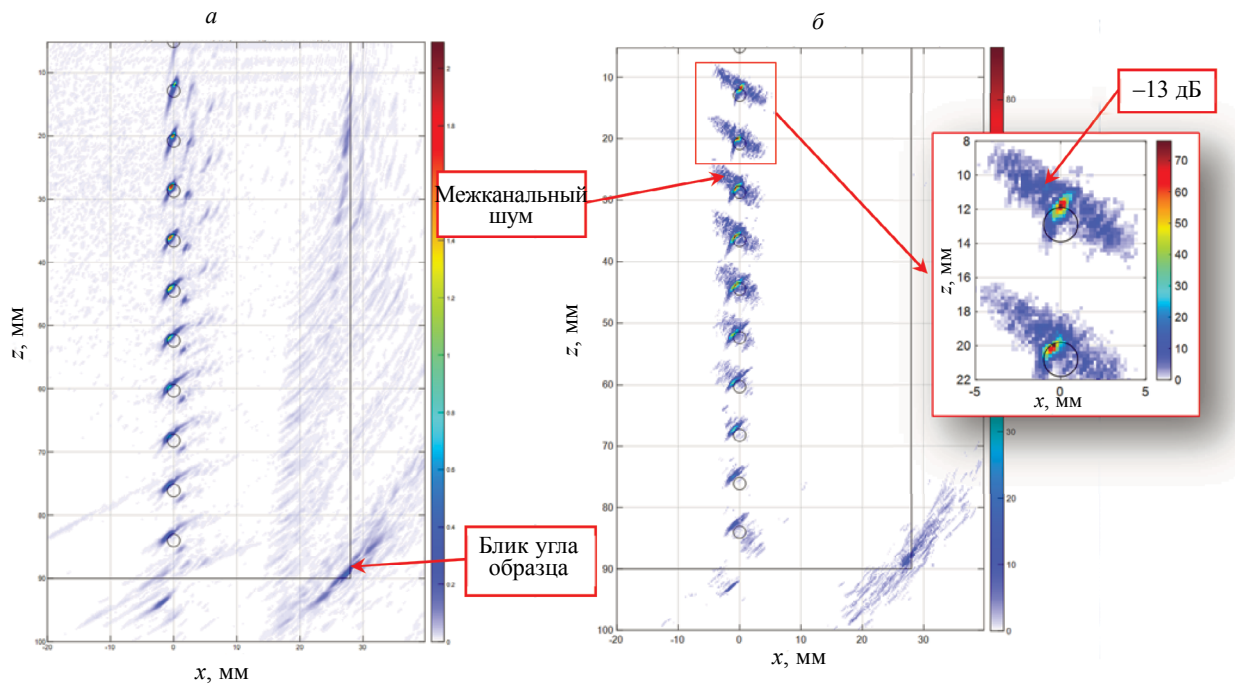


Рис. 7. ЦФА-Х-изображения:

a — простой сигнал, режим TDMA; *б* — Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 80.

верхние отражатели «освещаются» не с двадцати положений антенной решетки, а примерно с пяти, что и приводит к повышенному уровню межканального шума (см. раздел 3.2).

На рис. 8*a* показано корреляционное изображение отражателей, а на рис. 8*б* — изображение, полученное методом МЭ без декодирования эхосигналов (см. раздел 3.3) для двух положений АР — 17-е и 20-е положения. Так как метод МЭ для работы требует значительного объема памяти, то изображение восстанавливалось на меньшей ОВИ. Уровень межканального шума значительно уменьшился с -13 дБ примерно до -35 дБ. По сравнению с режимом тройного сканирования для регистрации 0,3 % эхосигналов было затрачено всего 0,3 % времени. Это очень существенный выигрыш в скорости регистрации эхосигналов и их объеме, но не следует забывать, что для восстановления МЭ-изображения требуется около 10 мин на современном персональном компьютере. На врезках рис. 8 показаны увеличенные фрагменты изображений. Разрешающая способность МЭ-изображения возросла примерно в 2 раза по сравнению с корреляционным изображением на рис. 8*a*.

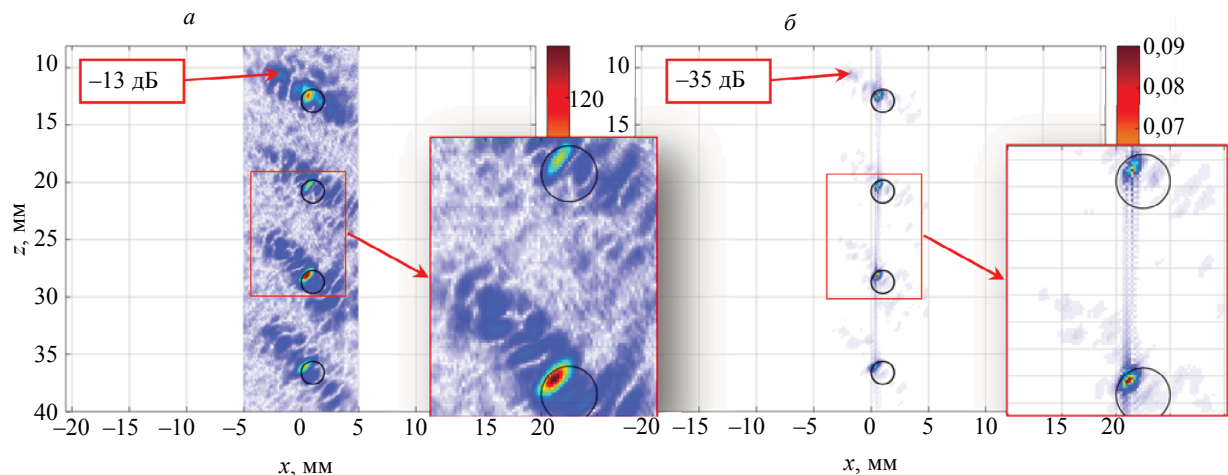


Рис. 8. Корреляционное изображение и МЭ-изображение для набора Касами-15 и положений АР 17 и 20.

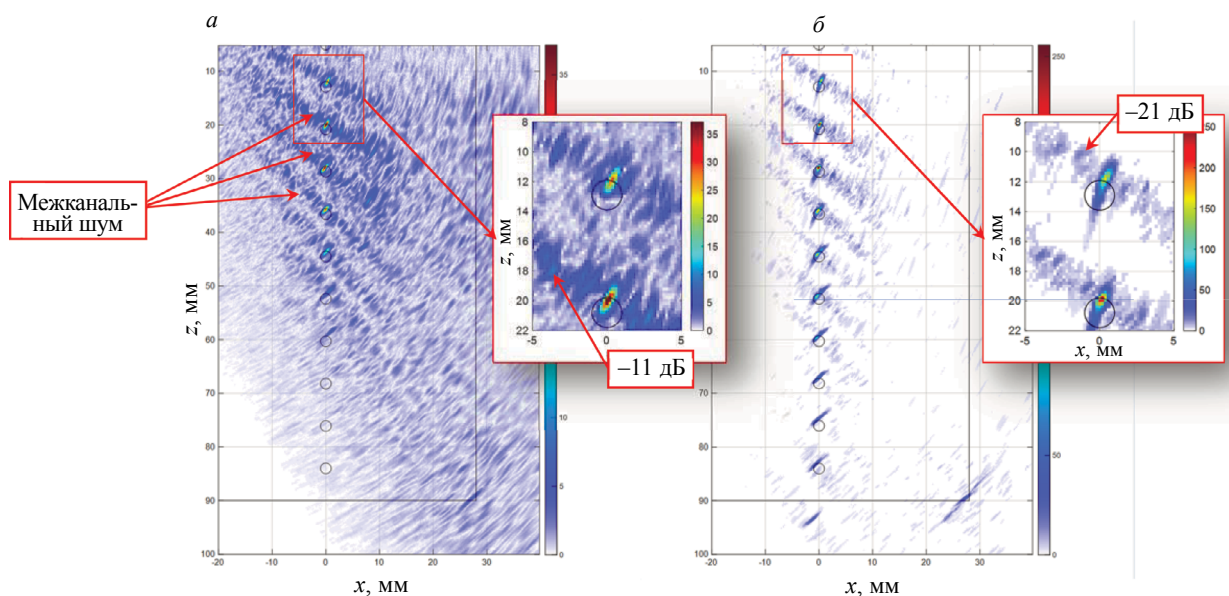


Рис. 9. Изображения, полученные при использовании кодов Касами-63, режим CDMA, СФ:
а — 17 положение; б — сумма 20.

На рис. 9а показано ЦФА-изображение границ БЦО, восстановленное по эхосигналам положения 17 антенной решетки, измеренных в режиме CDMA для кодовых последовательностей Касами-63 и при декодировании суммарных эхосигналов согласованной фильтрацией. Уровень межканального шума недопустимо высок и равен -11 дБ. На рис. 9б представлено ЦФА-изображение по всем двадцати положениям при излучении эхосигналов в режиме CDMA, декодировании их согласованной фильтрацией и когерентным сложением парциальных ЦФА-изображений, каждое из которых было подвергнуто операции отсечки по уровню, равному его матожиданию. Максимальный уровень межканальной помехи равен -21 дБ, что позволяет считать полученное изображение высококачественным в отличие от изображений на рис. 7в и г. Время регистрации и объем измеренных эхосигналов в режиме CDMA составляет около 3 % от аналогичных параметров для режима тройного сканирования.

4.2.3. Образец из стали 40 с одиннадцатью БЦО

В образце толщиной 210 мм, изготовленного из стали 40 с примесью никеля, наличие которого приводит к высокому уровню структурного шума, было просверлено четырнадцать сквозных БЦО диаметром 4 мм, расположенных на глубинах от 10 до 200 мм. Эхосигналы регистрировались АР (5 МГц, 32 элемента, размеры пьезоэлемента $0,9 \times 10$ мм, зазор 0,1 мм), установленной на плексигласовую 20-градусную призму. На рис. 10 приведено схематическое изображение образца



Рис. 10. Фотография образца толщиной 210 мм из стали 40 и схематическое изображение области сканирования.

и АР на призме. Измерения эхосигналов проводились в режиме тройного сканирования в $N_w = 60$ положениях с шагом 5 мм. АР на призме синего цвета схематически показана в начальном положении, а серого — в конечном. Стрелкой желтого цвета показана примерная величина апертуры и направление сканирования. Красным цветом выделена часть ОВИ.

ЦФА-изображения восстанавливались по эхосигналам в предположении, что изучение и прием происходят на поперечной волне. На рис. 11а приведено ЦФА-Х-изображение, полученное при

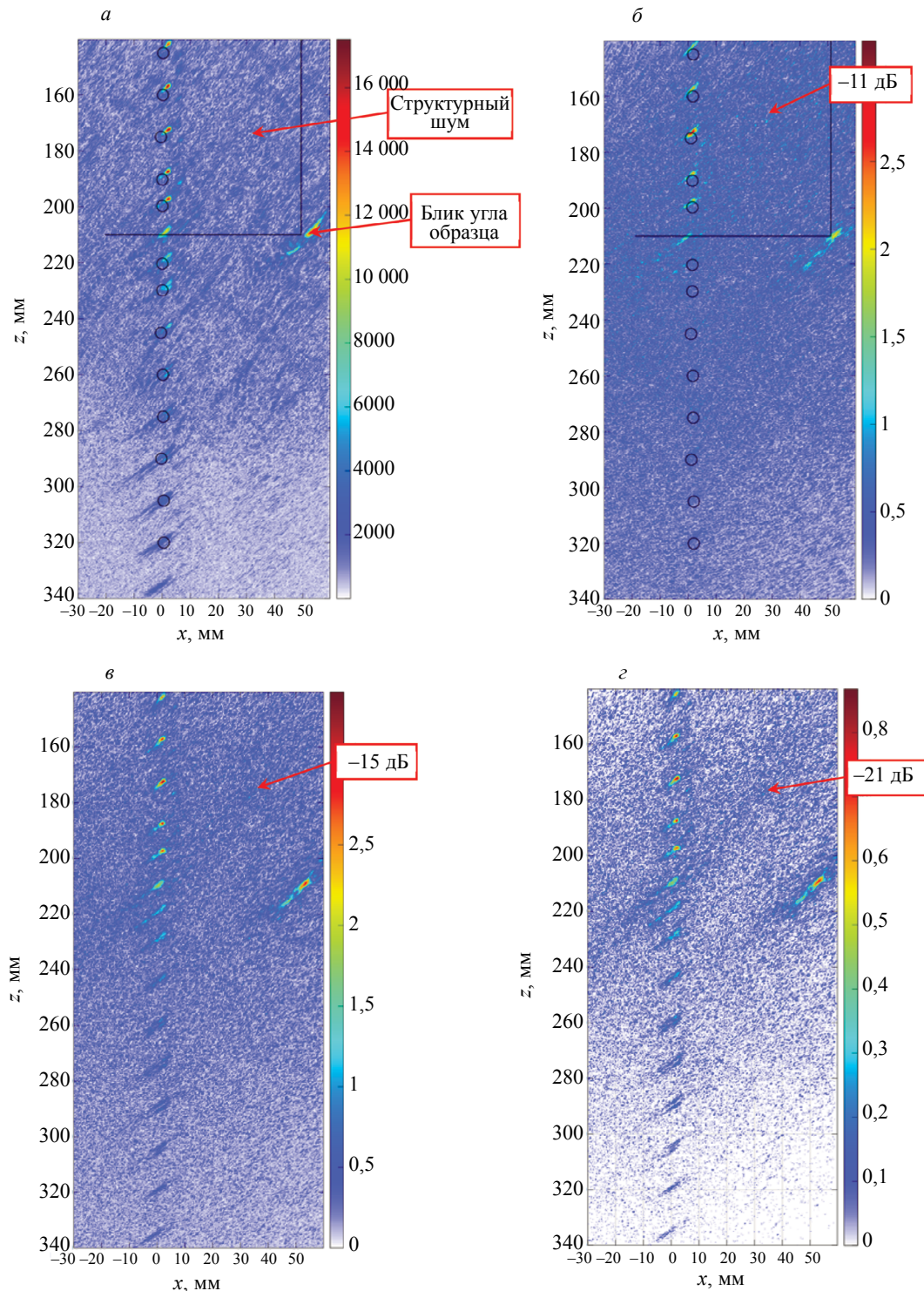


Рис. 11. ЦФА-Х-изображение:

a — простой сигнал, режим TDMA; *б* — Касами-15, режим CDMA, СФ, сумма 20; *в* — Касами-15×4, режим CDMA, СФ, сумма 120; *з* — Касами-15×4, режим CDMA, СФ, медиана 120.

излучении простого сигнала в режиме TDMA. На изображении нанесена маска образца. Различимы блики границ БЦО на прямом и однократном отражениях импульсов от дна и блик угла образца. На изображении присутствует структурный шум достаточно высокого уровня, а межканальные помехи отсутствуют. Время, требуемое для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования, и их объем для дальнейшего сравнения будем полагать равным 100 %. На рис. 11б показано ЦФА-Х-изображение при сложении шестидесяти парциальных ЦФА-изображений, восстановленных при использовании кодового набора Касами-15 в режиме CDMA. Декодирование суммы сложных сигналов проводилось методом СФ. Для получения данного изображения требуется всего 3 % времени и объема эхосигналов по сравнению с режимом тройного сканирования. Однако значение $SNR_{12} = 11$ дБ не позволяет считать восстановленное изображение высококачественным.

На рис. 11в показано ЦФА-Х-изображение, полученное при использовании сплит-сигналов Касами-15×4 в режиме CDMA при когерентном суммировании парциальных ЦФА-изображений. Для регистрации эхосигналов потребовалось 12 % времени и объема эхосигналов для режима тройного сканирования. К сожалению значение $SNR_{12} = 15$ дБ снова не удовлетворяет критерию высококачественного изображения. Если же 120 парциальных ЦФА-изображений объединить как медианы с отсечкой каждого ЦФА-изображения по уровню его матожидания, то удастся получить $SNR_{12} = 21$ дБ, которое удовлетворяет условию высококачественного изображения (рис. 11г).

5. ВЫВОДЫ

По результатам представленных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В трех модельных экспериментах показано, что применение технологии CDMA приводит к повышению скорости регистрации эхосигналов практически на порядок.

2. Технология CDMA позволяет получать высококачественные изображения ($SNR_{12} > 20$ дБ) за счет объединения с помощью операции медиана парциальных ЦФА-изображений и применения сплит-сигналов. Для уменьшения межканальных помех и уровня «боковых лепестков» до уровня –20 дБ через каждый элемент АР надо пропускать более 100 чипов (см. раздел 3.2).

3. Высококачественные изображения удалось получить при излучении сплит-сигналов и объединении изображения как медианы, для чего потребовалось только 12,5 % эхосигналов, при этом скорость регистрации удалось повысить в 8 раз.

4. Перспективным методом восстановления изображения отражателей является метод максимальной энтропии без декодирования, позволяющий уменьшить объем используемых эхосигналов (более чем в 100 раз!) и при этом получать высококачественные изображения.

Авторы благодарны С.Ю. Романову, ведущему научному сотруднику НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, за замечания и предложения, высказанные в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications / Publisher: Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Gutiérrez-Fernández César, Jiménez Ana, Martín-Arguedas Carlos Julián, Ureña Jesús, Hernández Álvaro. A Novel Encoded Excitation Scheme in a Phased Array for The Improving Data Acquisition Rate // Sensors. 2014. V. 14 (1). P. 549—563.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
7. Chatillon S., Fidahoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / NDT in Canada 2009 National Conference, Aug 25-27, 2009.
8. Bolotina I., Dennis M., Mohr F., Kröning M., Reddy K.M., Zhantlessov Y. 3D Ultrasonic Imaging by Cone Scans and Acoustic Antennas / 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012. Durban. South Africa.

9. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42—52.
10. «АКС»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1550-introvisor/> (дата обращения: 15.12.2019).
11. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Бутов А.В., Вотицкий А.Х., Тихонов Д.С. Пат. RU 2 649 028 C1, МПК G01N 29/44 Приемопередающее устройство [Текст] // Заявл. 29.12.2016; опубл. 12.03.2018. Бюл. № 8.
12. Jeune L. Imagerie ultrasonore par emission d'ondes planes pour le contrôle de structures complexes en immersion / Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université Paris-Diderot. Paris. 2016. P. 119.
13. Kasami T. Weight Distribution Formula for Some Class of Cyclic Codes / Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois. 1966. April.
14. Gold R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // IEEE Transactions on Information Theory. (October 1967). V. 13 (4). P. 619—621. doi:10.1109/TIT.1967.1054048
15. de Bruijn N.G. A combinatorial problem // Koninklijke Nederlandse Akademie v. Wetenschappen. 1946. V. 49. P. 758—764.
16. Chu D.C. Polyphase codes with good periodic correlation properties // IEEE Trans. Inform. Theory. July. 1972. P. 531—532. doi:10.1109/TIT.1972.1054840
17. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
18. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 772—783.
19. Smith P.F., Player M.A. Deconvolution of bipolar ultrasonic signals using a modified maximum entropy method // J. Phys. D Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 1714—1721.
20. Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Шалимов Е.В. Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника». М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 220 с.
21. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 235—254.
22. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей по ультразвуковым эхосигналам методом максимальной энтропии // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 33—60.
23. «ЭХО+»: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.12.2019).
24. Hsiao-Hwa Chen. The Next Generation CDMA Technologies. ISBN: 978-0-470-02294-8, 2007. September. P. 476.