

## ФР-ДЕФЕКТОСКОП: ПОЧЕМУ 32 КАНАЛА ЛУЧШЕ, ЧЕМ 16



**А. Е. Базулин,**  
гл. конструктор, канд. техн.  
наук



**Е. Г. Базулин,**  
зам. ген. директора  
по науч. вопросам,  
нач. системного отдела,  
д-р техн. наук



**А. Х. Вопилкин**  
д-р техн. наук, проф.,  
ген. директор



**Д. С. Тихонов,**  
зам. ген. директора,  
канд. техн. наук

Для визуализации внутреннего объема объектов контроля (ОК), как правило, используются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [1], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2]. В настоящее время на рынке представлено множество дефектоскопов как для ручного контроля, так и для автоматизированного с разным количеством каналов – от 16 до 1024 и, естественно с разными ценами: от 10 000 до 1 000 000 USD. Наибольшей популярностью для УЗК пользуются дефектоскопы с числом независимых каналов 16, 32 или 64, которые позволяют проводить физическую фокусировку ультразвукового поля антенной решеткой с таким же числом каналов. Как правило, современные дефектоскопы с помощью коммутатора увеличивают число контактов до 128, что позволяет подключить четыре 32-элементных антенных решетки при числе независимых каналов дефектоскопа большем или равном 32. Естественно, возникает вопрос: какой дефектоскоп лучше приобрести, не войдя, с од-

Проанализированы преимущества применения 32-канальных дефектоскопов по сравнению с 16-канальными. В численных экспериментах продемонстрировано, что фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов. На больших толщинах лучше работать 32-элементной решеткой, так как ближняя зона больше. Использование антенных матриц эффективнее для 32 каналов (8 на 4), так как можно повысить фронтальное разрешение вдоль оси шва. Наличие у дефектоскопа 32 каналов позволяет использовать две 16-элементных антенных решетки слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам. Большой захват у 32-элементной решетки дает возможность быстрее проводить сплошную толщинометрию по сравнению с использованием антенной решетки из 16 элементов.

ной стороны, в излишние расходы и, с другой стороны, не потеряв качество изображения отражателей?

Кратким ответом на вопрос: почему 32 канала лучше 16, служат следующие утверждения:

- фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов вместо 16;
- ближняя зона у 32-элементной решетки больше, поэтому для контроля объекта большой толщины лучше использовать дефектоскоп с 32 и более независимыми каналами;
- изображения по акустической схеме, когда используется прямой луч и однократно отраженный, для 32-элементной решетки лучше;
- если апертуру 16-элементной решетки сделать такой же, что и у 32-элементной решетки за счет увеличения зазора, то уровень «боковых лепестков» будет неприемлемо высок;
- дефектоскоп с 32 независимыми каналами позволяет использовать антенную матрицу из 8×4 элементов, что позволит повысить качество изображения отражателей;
- 32 канала позволяют использовать две антенных решетки из 16 элементов, размещаемых слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам, на котором полностью будет восстановлено изображение границы отражателя;
- больший захват у 32-элементной решетки позволяет быстрее проводить сплошную толщинометрию.

Рассмотрим более подробно приведенные утверждения на примере изображений эхосигналов, восстановленных методом ЦФА по эхосигналам, рассчитанным в программе CIVA [3].

Расчеты, если это не оговорено специально, проводились для антенных решеток из 16 или 32 элементов с шириной элемента 0,9 мм и зазором между элементами 0,1 мм. Центральная частота излучаемых сигналов была равна 5 МГц.

### Фронтальная разрешающая способность изображения выше при использовании 32 элементов вместо 16

Это утверждение, конечно же, справедливо для случая, если размеры элемента антенной решетки и зазор между элементами совпадают.

На рис. 1 показано ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б) расположенных на глубине примерно 14 мм в образце толщиной 20 мм. Контуры отверстия и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. Расстояние между центрами отверстий бокового сверления составляет около 2 мм, и их удалось разрешить только при использовании 32-элементной решетки. Отметим, что блик, сформированный импульсом обегания-соскальзывания на изображении, полученном антенной решеткой из 32 элементов, примерно на 6 дБ меньше, чем для 16-элементной антенной решетки.

Так как ближняя зона у 32-элементной решетки для стали на поперечной волне составляет около 140 мм, а для 16 – около 20 мм, то, конечно же, работа на глубинах больше 30...40 мм требуют использования 32-элементной решетки. На рис. 2 показано ЦФА-изображение двух отверстий бо-

вого сверления диаметром 1 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б), расположенных на глубине примерно 54 мм в образце толщиной 60 мм. Контуры отверстия и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. Расстояние между центрами отверстий бокового сверления было равно около 3,6 мм, и их удалось разрешить только при использовании 32-элементной решетки. Отметим, что на рис. 2, а ложный блик, сформированный по акустической схеме (излучение на прямом луче, а прием на однократно отраженном), имеет амплитуду больше на 6 дБ по сравнению с рис. 2, б.

Недостаточная фронтальная разрешающая способность может привести к тому, что блики от конструктивных отражателей могут замаскировать блики вершины придонной трещины в области трапециевидальной проточки. На рис. 3, а показано ЦФА-изображение модели трещины высотой 4 мм, расположенной в области проточки высотой 2 мм в образце толщиной 20 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б). Контуры трещины и дна образца показаны на рисунках линиями черного цвета. На рис. 3, а блик от вершины трещины теряется на фоне блика проточки, и только при использовании 32-элементной решетки данный блик легко обнаруживается (рис. 3, б). Отметим, что на ЦФА-изображении на рис. 3, а очень хорошо восстановилось изображение наклонной области проточки.

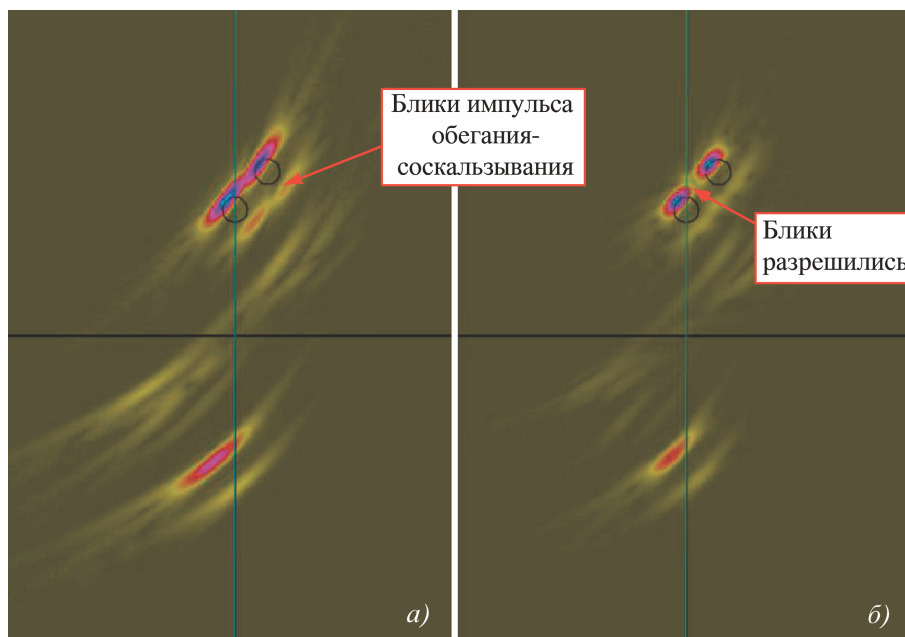


Рис. 1. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине примерно 14 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б)

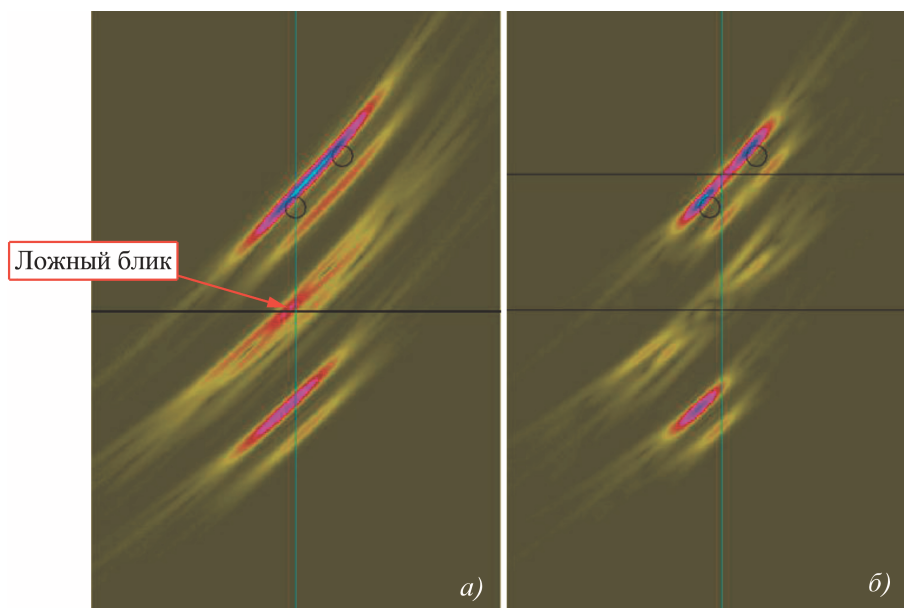


Рис. 2. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине 54 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 (б) элементов

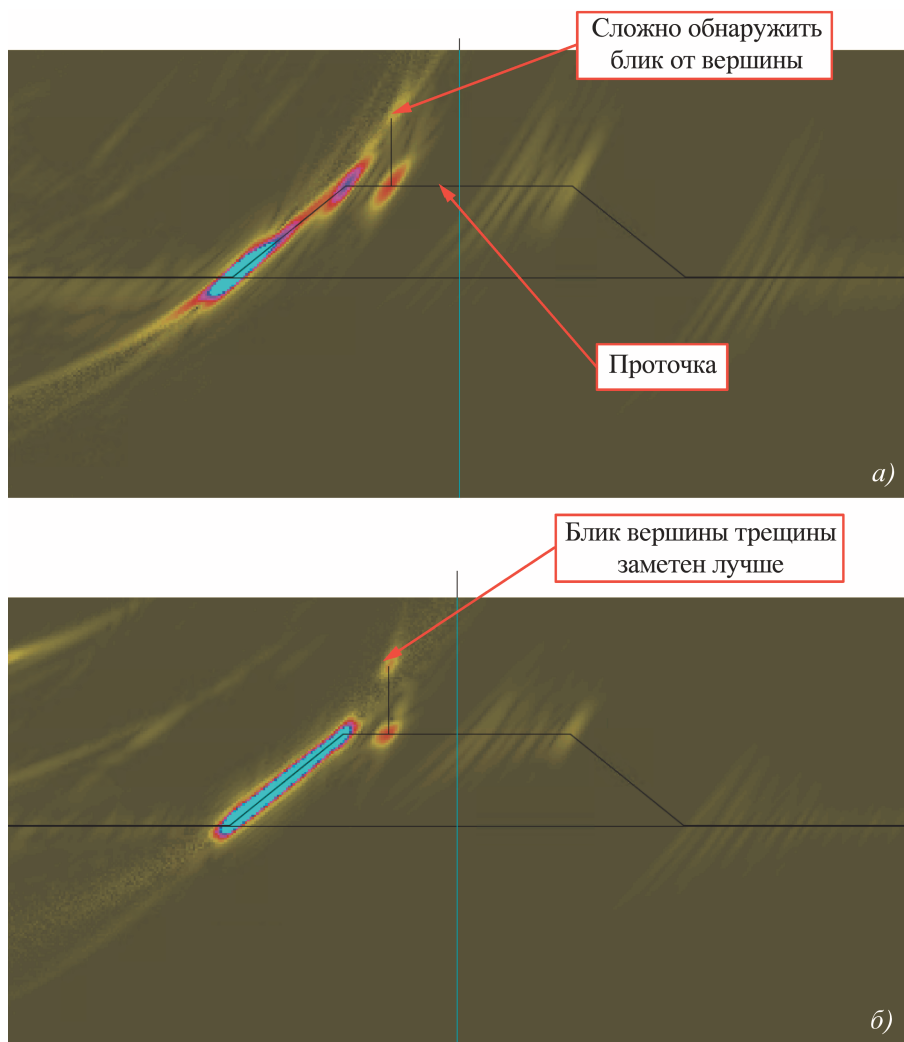


Рис. 3. ЦФА-изображение модели трещины высотой 4 мм, расположенной в области проточки высотой 2 мм в образце толщиной 20 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 (а) и 32 элементов (б)

### Что будет, если апертуру 16-элементной решетки сделать такой же, что и у 32-элементной решетки, за счет увеличения зазора?

Так как разрешающая способность изображения, сформированного антенной решеткой, определяется ее размером, то можно, увеличив зазор между элементами 16-элементной антенной решетки, сделать такую же апертуру, как и у 32-элементной. Если зазор у 16-элементной решетки увеличить с 0,1 до 1,1 мм, то ее апертура будет примерно такой же, что и у 32-элементной. На рис. 4 показан результат восстановления изображения двух отверстий бокового сверления. По сравнению с изображением на рис. 1, б в полученном изображении уровень «боковых лепестков» увеличился более чем на 12 дБ, но фронтальное разрешение обоих изображений одинаковое. Это связано с тем, что шаг между центрами элементов антенной решетки с 1 мм увеличился до 2 мм.

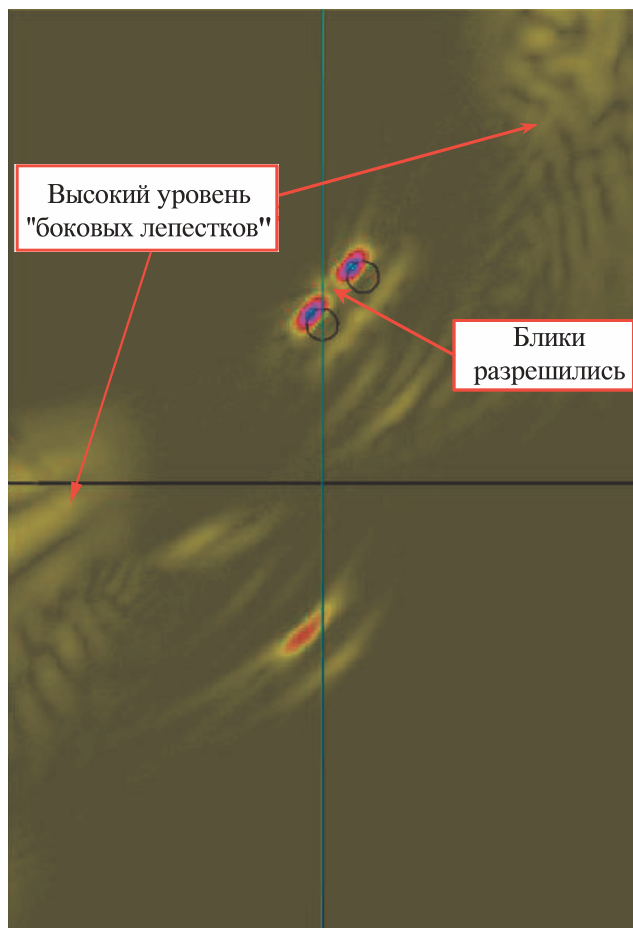


Рис. 4. ЦФА-изображение двух отверстий бокового сверления диаметром 1 мм на глубине примерно 14 мм, восстановленное по эхосигналам, рассчитанным для антенной решетки из 16 с зазором между краями элементов 1,1 мм

### Изображения по акустической схеме с одним отражением от дна

В практике ультразвукового контроля блик вершины придонной трещины может затеряться в шуме. Подобная ситуация показана на рис. 3, а – блик вершины придонной трещины маскируется расплывшимся бликом выточки. По изображению на рис. 3, а можно сделать вывод о том, что обнаружен корень придонной трещины, но оценить ее высоту, в отличие от изображения на рис. 3, б, достаточно сложно.

Уточнить высоту трещины можно по изображению, восстановленному по акустической схеме с одним отражением от дна, когда отражатель освещается на прямом луче, а прием эхосигналов осуществляется с однократным отражением от дна. Схематическое распространение лучей показано на рис. 5 вверху справа. На этом же рисунке показано изображение трещины высотой 5 мм в объекте контроля толщиной 20 мм, полученное антенной решеткой из 16 (а) и 32 элементов (б). Если оценивать высоту придонной трещины по уровню желтого цвета, что составляет уровень примерно –6 дБ от максимальной амплитуды блика, то с помощью 32-элементной антенной решетки ее высоту можно оценить как 6 мм (ошибка 20 %), для 16-элементной оценка будет 8 мм (ошибка около 60 %).

### Восстановление изображений по N-, P- и NP-каналам

Наличие 32 независимых каналов позволяет использовать две 16-элементные антенные решетки слева и справа от шва для получения объединенного изображения по N-, P- и NP-каналам. Такое объединенное изображение позволяет получить информацию о типе отражателя, так как восстанавливается вся граница отражателя.

В статье [4] продемонстрирована возможность получения объединенного изображения по изображениям по N-, P- и NP-каналам, на котором можно восстановить границы отражателя. Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились 64-канальным ЦФА-дефектоскопом «АВГУР-АРТ», разработанным и изготавливаемым в Научно-производственном центре «ЭХО+» [5]. Для регистрации использовались две 32-элементные антенные решетки с эффективной частотой 5 МГц, размерами элементов 0,9 мм и зазором между ними 0,1 мм. Антенные решетки были установлены на призмы из рексолита с углом наклона 35°.

Акустический канал – это настройка аппаратуры, описывающая порядок работы в режиме двойного сканирования одной или двух антенных решеток, значение коэффициента усиления приемника, параметры зондирующего импульса, временную апертуру регистрации эхосигналов и пр.



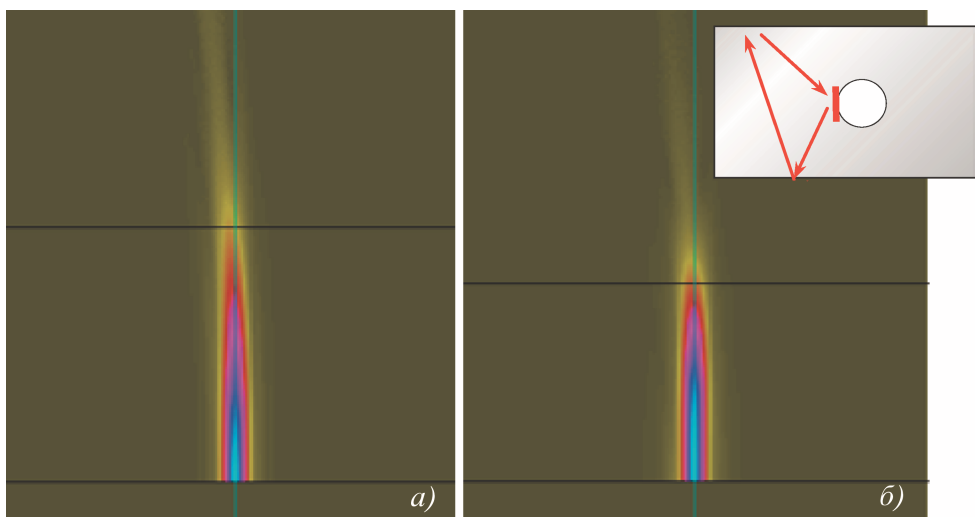


Рис. 5. ЦФА-изображение трещины высотой 5 мм в объекте контроля толщиной 20 мм полученное антенной решеткой из 16 (а) и 32 элементов (б) по акустической схеме с одним отражением от дна объекта контроля

#### Отверстие диаметром 2 мм на глубине 6 мм в образце толщиной 18 мм

Образец толщиной 18 мм с отверстием бокового сверления диаметром 2 мм на глубине 6 мм предназначен для имитации объемного дефекта, расположенного у поверхности. На рис. 6, а показано одно изображение, восстановленное на прямом луче на поперечной волне по эхосигналам N-канала. Сделать вывод о форме отражателя крайне сложно, так как удалось восстановить, хоть и с высоким фронтальным разрешением, только часть

границы отверстия бокового сверления. Наличие блика, сформированного волной обегания, очень сложно достоверно связать с бликом границы отражателя, и поэтому этот признак трудно применять на практике. Объединенное изображение, полученное по каналам с N-, P- и NP-сторон по акустическим схемам на поперечной волне на прямом и однократно отраженном от дна лучах, позволяет восстановить полностью границу отверстия бокового сверления, по которому с помощью маркеров можно определить его диаметр (рис. 6, б).

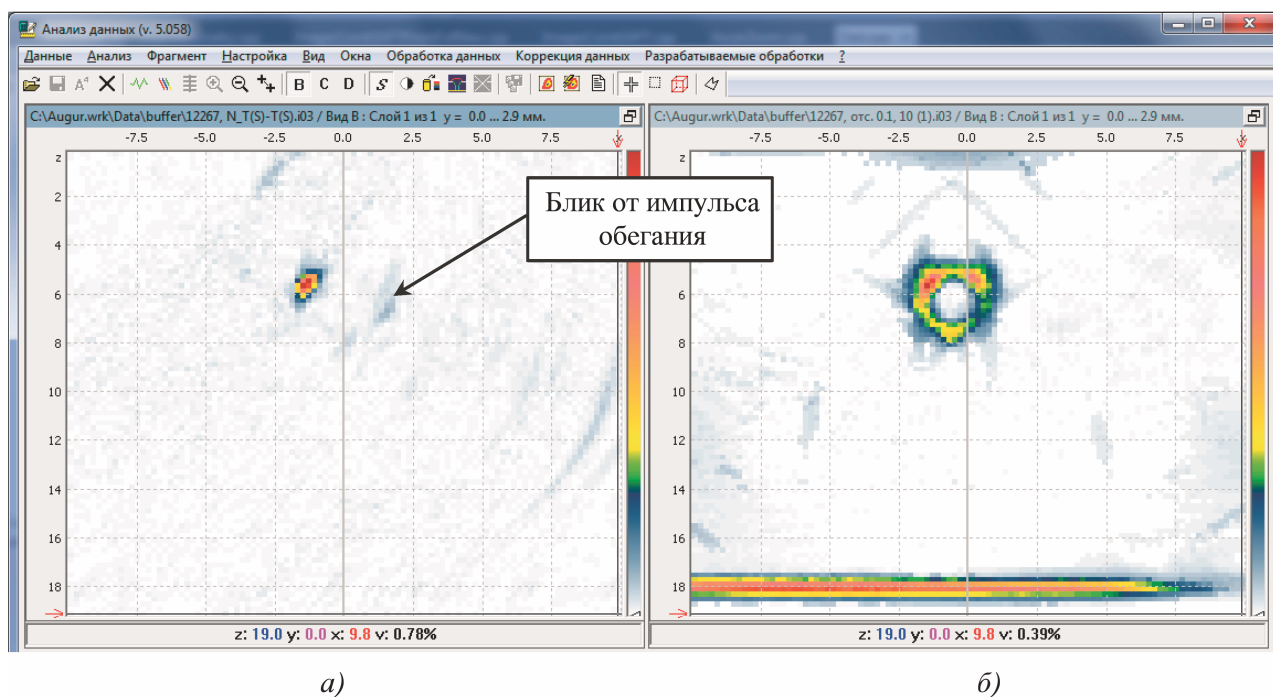


Рис. 6. Изображение границы отверстия диаметром 2 мм, полученное по эхосигналам N-канала (а) и по эхосигналам N-, P- и NP-каналов (б)

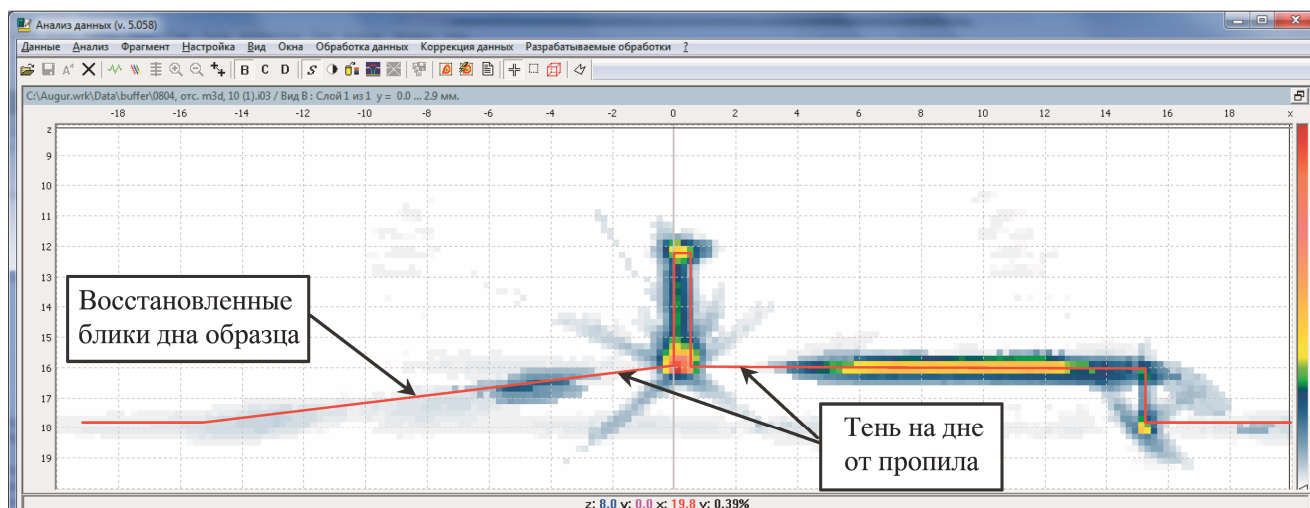


Рис. 7. Изображение дна и границы паза высотой 4 мм, полученное по эхосигналам N-, P- и NP-каналов

### Придонный паз высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном

Образец с пропилом шириной 0,5 мм и высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном предназначался для имитации придонной трещины. На рис. 7 показано объединенное изображение, полученное по каналам с N-, P- и NP-сторон по акустическим схемам на поперечной волне на прямом и однократно отраженном от дна лучах. Контуры образца показаны линиями красного цвета. По данному изображению можно получить изображение дна и восстановить практически полностью границу пропила. В качестве дополнительного признака наличия трещины, растущей от дна объекта контроля, может служить тень от пропила на дне образца.

### Большая скорость проведения сплошной толщинометрии для 32-элементной антенной решетки

При сплошной толщинометрии по поверхности объекта контроля сканирует антенная решетка, которая, используя фокусировку, позволяет получить высококачественное изображение дна объекта контроля. Очевидно, что больший захват у 32-элементной антенной решетки позволяет в 2 раза быстрее проводить сплошную толщинометрию, чем в случае использования 16-элементной решетки.

### Выводы

Таким образом, можно подвести итоги сравнения ЦФА-изображений, восстановленных по эхо-

сигналам, полученным с использованием антенных решеток из 16 и 32 элементов.

- Для случая двух боковых отверстий из-за лучшего фронтального разрешения эффект применения 32-элементной решетки очевиден (см. рис. 1 и 4).

- Относительная погрешность определения высоты придонной трещины высотой 4 мм на глубине 20 мм при использовании 32-элементной антенной решетки равна примерно 20 %, а при использовании 16-элементной – 60 %.

- Работа с двумя 16-элементными решетками на 32-канальном дефектоскопе позволяет восстановить границу отражателя и сделать обоснованный вывод о типе обнаруженного отражателя.

### Библиографический список

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
2. **Воронков В. А., Воронков И. В., Козлов В. Н. и др.** О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64 – 70.
3. **EXTENDE**: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 15.01.2020).
4. **Базулин Е. Г.** Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12 – 22.
5. **«ЭХО+»**: официальный сайт фирмы. URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 15.01.2020).