

20-ая Всероссийская научно-техническая конференция по НК и
ТД, 3-6 марта 2014 год, Москва

Разработка алгоритмов для ультразвуковой дефектометрии с применением антенных решёток

Базулин Е.Г.

Россия, Москва, НПЦ «ЭХО+»

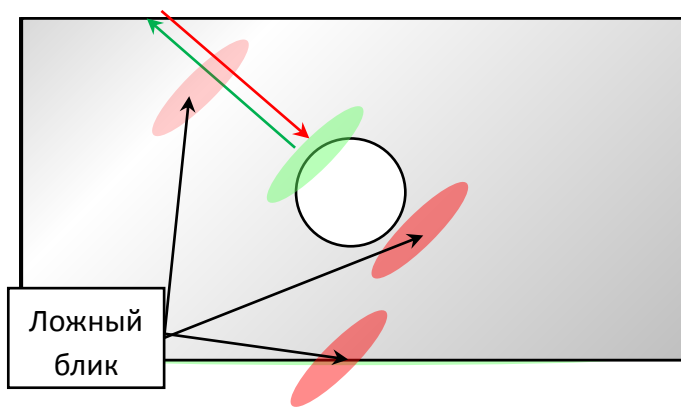
2014



Повышение достоверности УЗК

Высококачественное изображение:

- позволяет восстановить форму всей границы отражателя с фронтальной и продольной разрешающей способностью порядка четверти длины волны;
- имеет уровень шума и амплитуду ложных бликов на 20 дБ меньше амплитуды бликов, соответствующих отражателям.

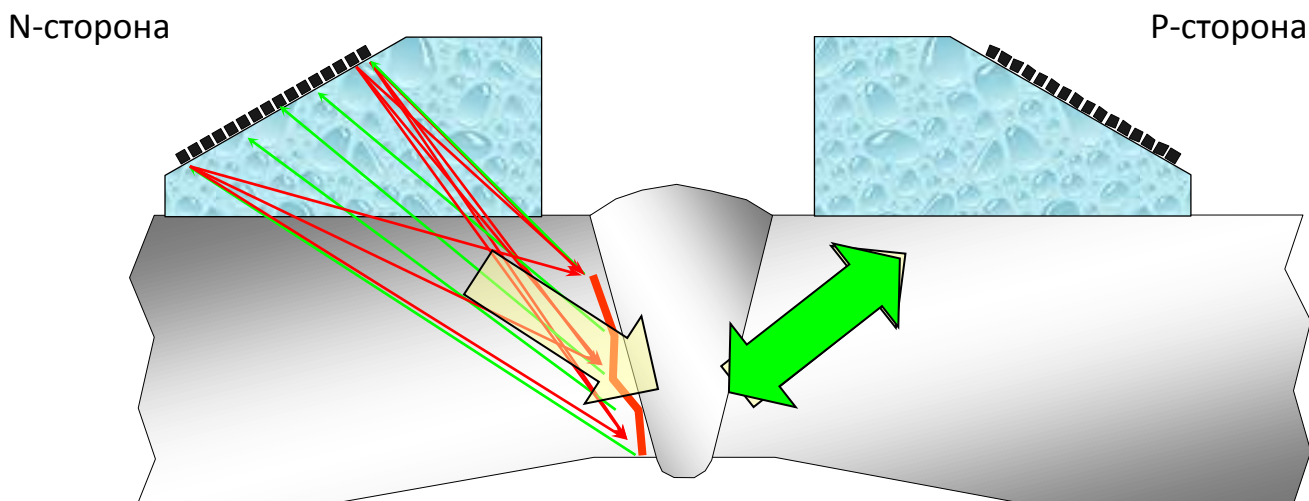


Различные сочетания этих методов позволяют восстанавливать высококачественные изображения отражателей, что повысит достоверность проведения УЗК.

1. Использование акустических схем с учётом трансформации типов волн при многократном отражении от неровных границ объекта контроля при наличии областей с разными акустическими свойствами.
2. Совместная когерентная обработка эхосигналов для разных положениях антенной решётки вдоль оси x и вдоль оси y .
3. Применение методов нелинейной обработки (построение AR-модели спектров эхосигналов, метод максимальной энтропии (ММЭ))
4. Использование сложных сигналов с их деконволюцией ММЭ.

Режим двойного сканирования

Режим двойного сканирования - это регистрация эхосигналов для всех комбинаций пар элементов одной или двух антенной решетки (FMC, бистатический режим, комбинационный режим).



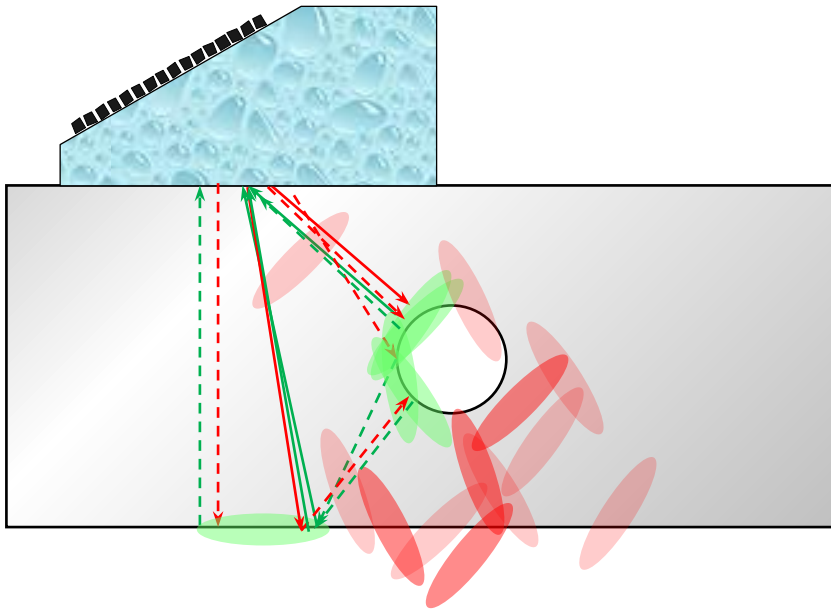
Для двух антенных решёток аппаратура поддерживает работу по **N-**, **P-** и **NP-акустическим каналам**.

C-SAFT - метод комбинированной синтезированной апертуры позволяющий получить изображения по эхосигналам измеренным в режиме двойного сканирования (ЦФА).

Блик - фрагмент изображения, имеющий максимум амплитуды и соответствующий границе несплошности.

Ложный блик - блик не соответствующий границе несплошности.

Обозначение акустических схем



T(S)-T(S) - контроль на прямом луче на поперечной волне.

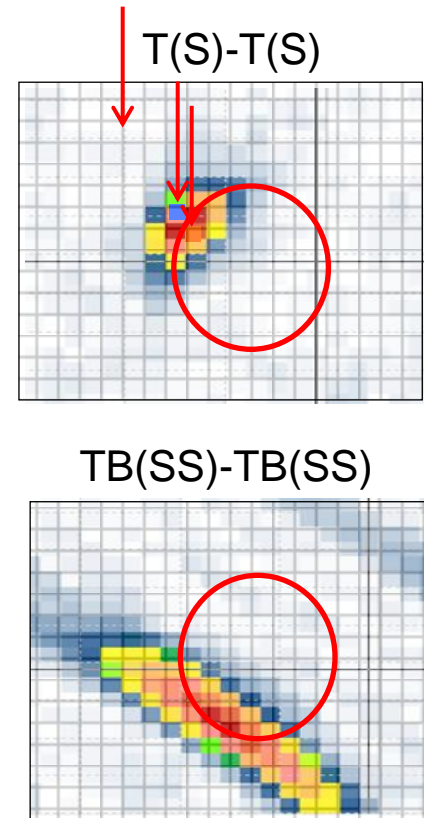
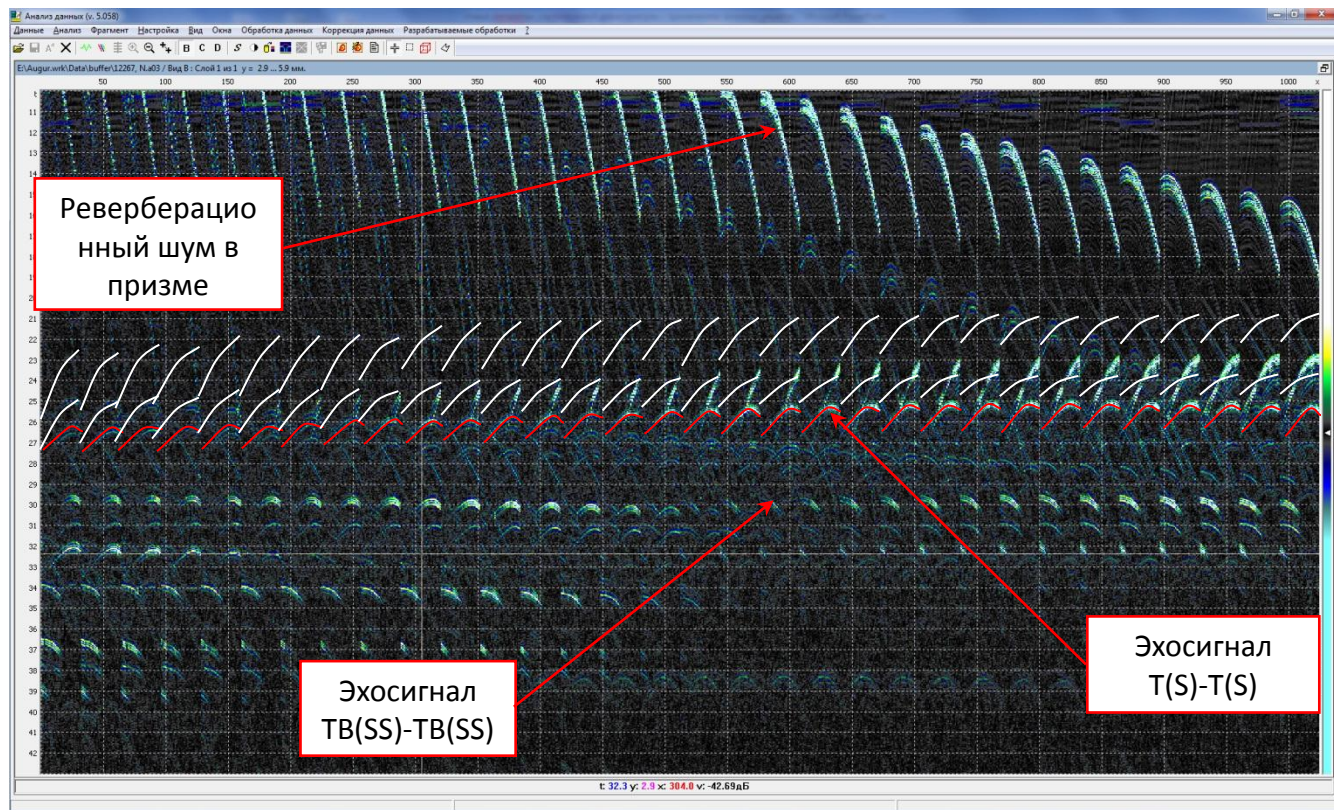
T(L)-T(L) - контроль на прямом луче на продольной схеме.

T(L)-TB(SL) - контроль по схеме «самотандем»

TB(SL)-TB(SL) - контроль на однократно отражённом луче с трансформацией типа волны

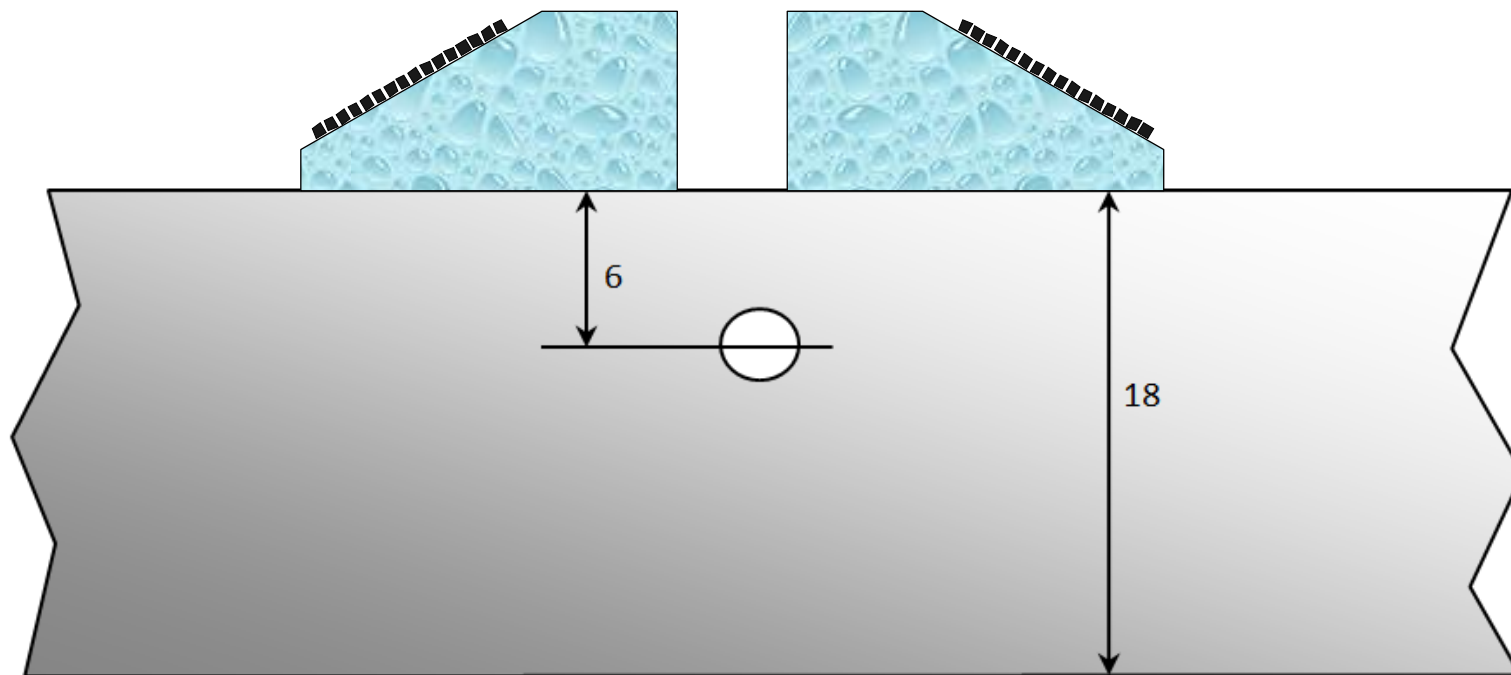
Анализ амплитуды эхосигнала и времени его прихода позволяет из множества схем выбрать **независимые** и **значимые акустические схемы** и тем самым уменьшить объем вычислений.

Принцип работы алгоритма C-SAFT для одной акустической схемы



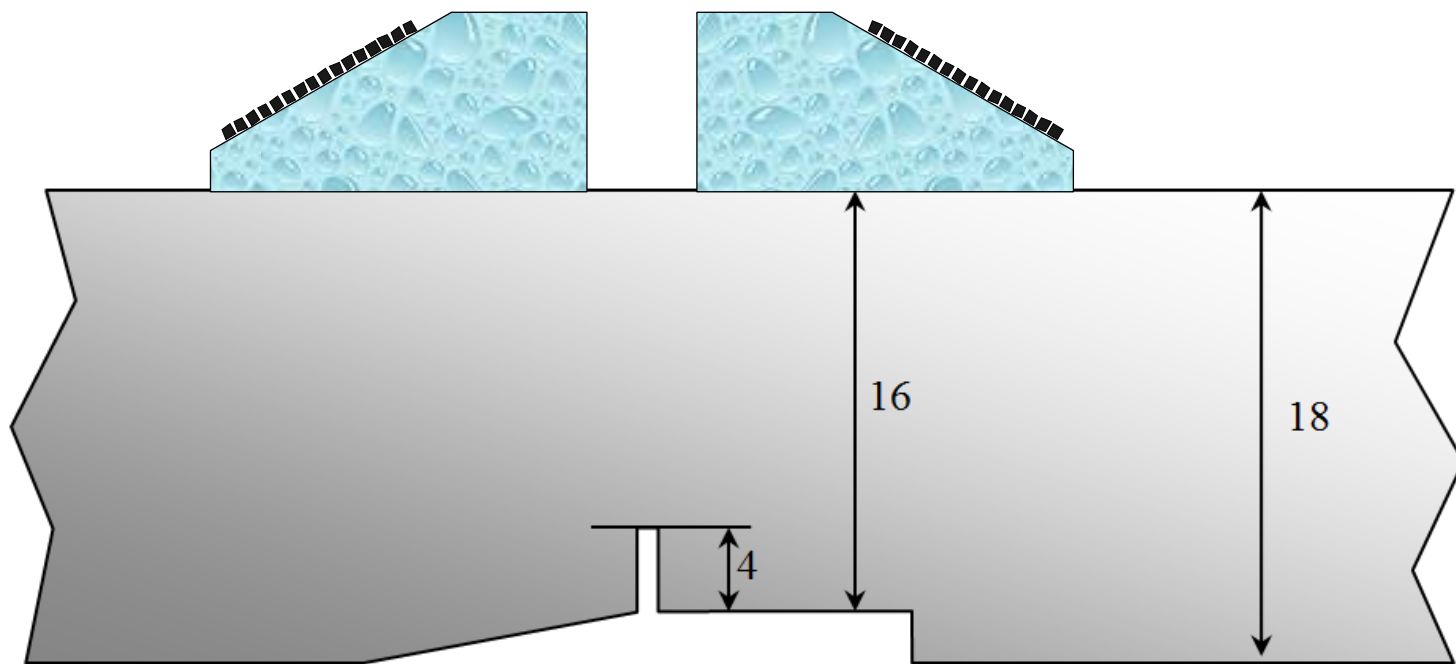
Для каждой точки ОВИ рассчитываются задержки для заданной акустической схемы, из измеренных эхосигналов извлекаются их значения, их сумма и есть изображение дефектов в выбранной точке ОВИ.

Получение изображения всей границы отверстия диаметром 2 мм



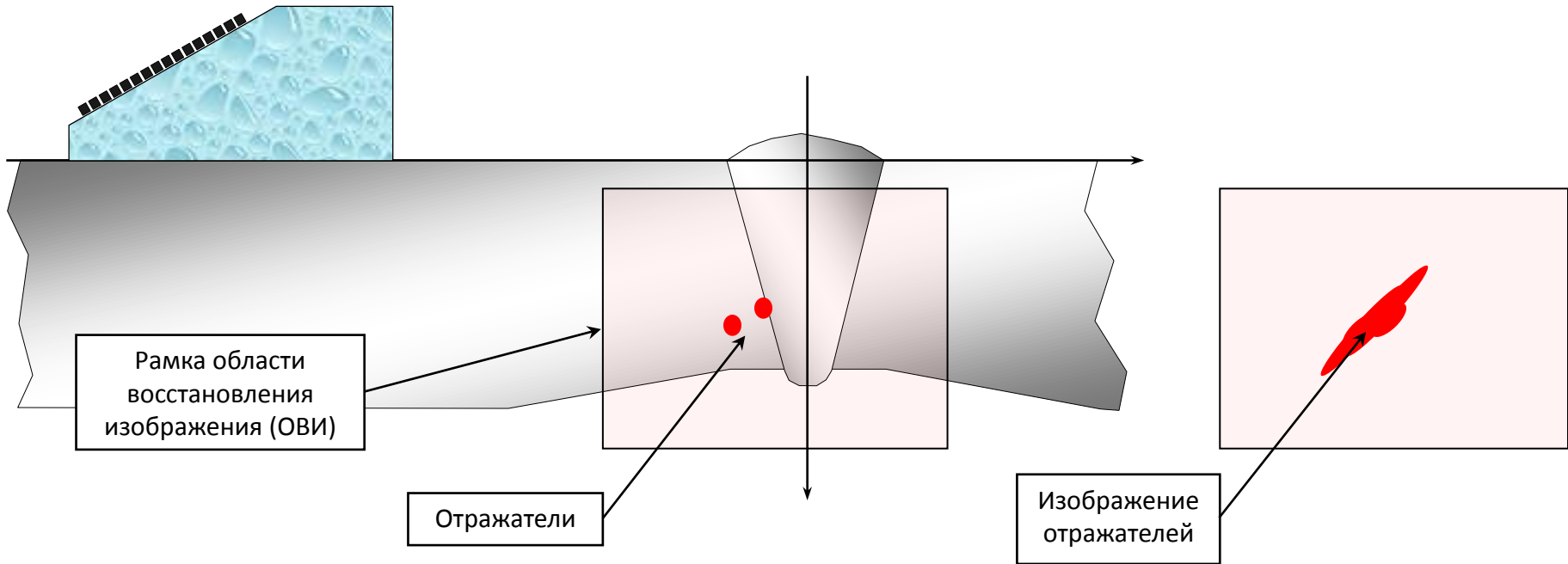
Использование двух антенных решёток позволяет получить изображение методом M-C-SAFT **всей границы отверстия**. После процедуры сверхразрешения (расщепление спектра и построение AR-модели) разрешающая способность возросла в **три раза**.

Получение изображения всей границы паза высотой 4 мм



После процедуры сверхразрешения удалось восстановить две стенки паза шириной 0.7 мм.

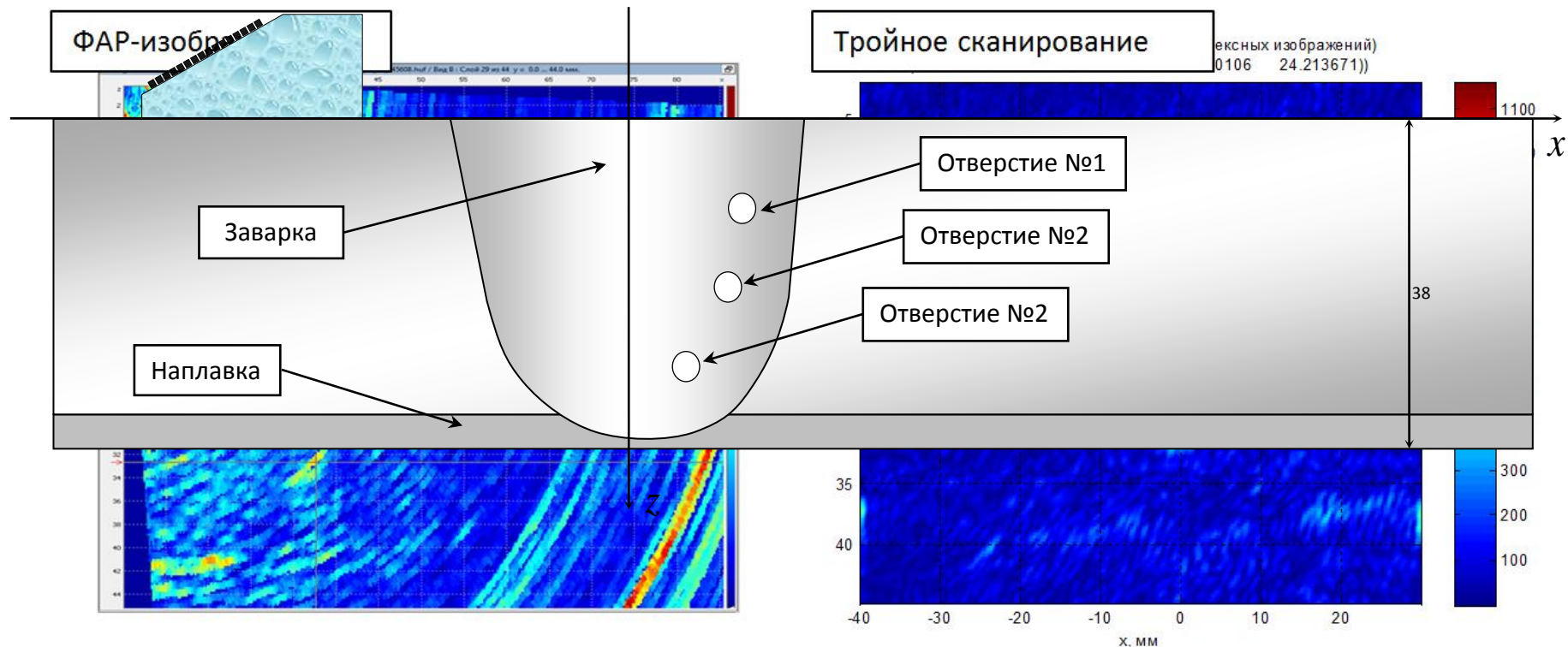
Метод ЦФА-Х



Предложен режим тройного сканирования (ЦФА-Х) для регистрации эхосигналов, когда кроме электронного сканирования есть обычное механическое сканирование АР или АМ.

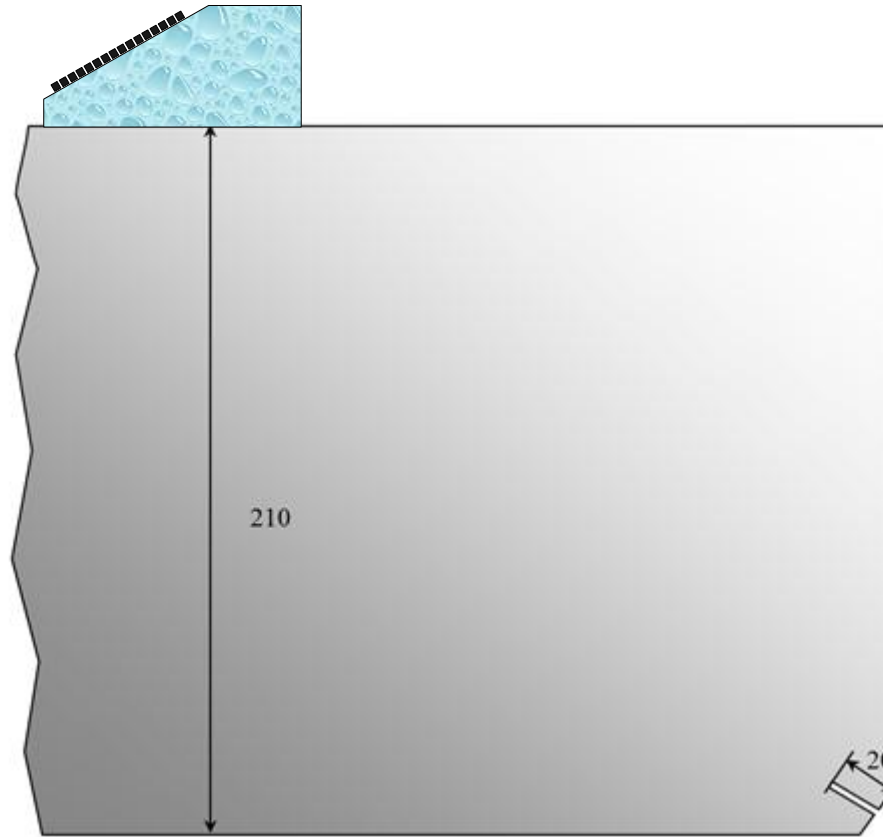
В этом режиме можно получать сфокусированные изображения за пределами ближней зоны АР, что особенно актуально для объектов контроля толщиной более 70 мм и для объектов с высоким структурным шумом.

Повышение отношения сигнал/шум в материалах со структурным шумом



Фронтальное разрешение возросло более чем в **два** раза, а отношение сигнал/шум увеличилось на **12** дБ, в сравнении с ФАР-изображением.

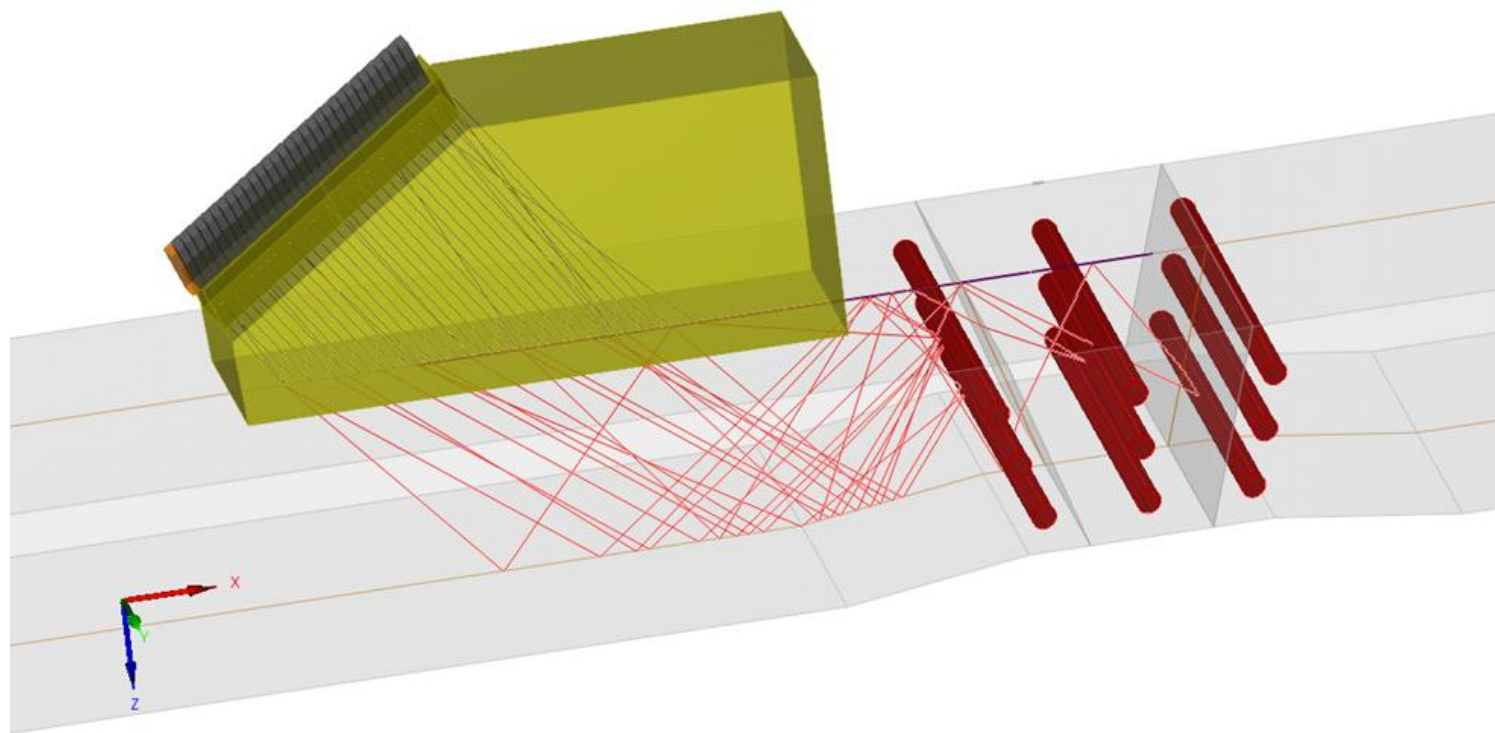
Повышение отношения сигнал/шум за счёт трёхмерной обработки (ЦФА-ХУ)



Изображение плоскодонного отверстия диаметром 2.5 мм (5 мм²) под углом 55 градусов на глубине 195 мм.

Отношение сигнал/шум возросло более чем на **12 дБ**.

Учёт разных акустических свойств в объекте контроля



Изображения границ отверстий при расчёте времени распространения по принципу Ферма (вверху) без учёта разных скоростей звука и при трассировке лучей (внизу) с учётом разных скоростей звука.

Метод максимальной энтропии (ММЭ)

Для восстановления изображения несплошностей применялся **ММЭ**, который принадлежит к семейству методов решения обратных задач методом регуляризации по Тихонову.

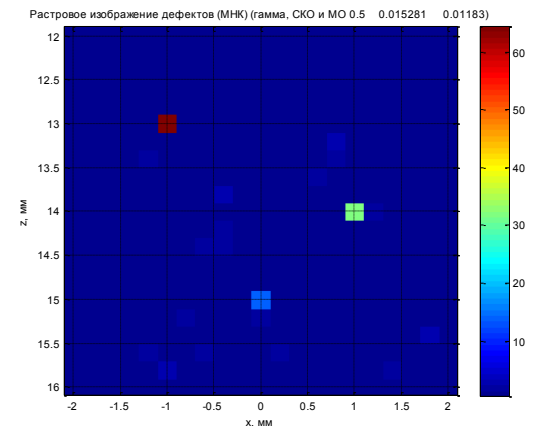
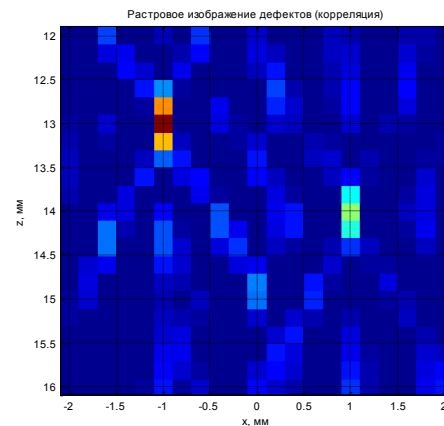
$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_{i,x}N_{i,z}}} \left(\chi^2(\hat{\varepsilon}) + \alpha \Omega(\hat{\varepsilon}) \right)$$

$\chi^2(\hat{\varepsilon}) = \left\| P(\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_t, t)) - p(\mathbf{r}_r, t) \right\|$ - разница между функциями в метрике L_2

$$\Omega(\hat{\varepsilon}) = - \sum_{i=1}^{N_{i,x}N_{i,z}} \hat{\varepsilon}_i \ln \frac{\hat{\varepsilon}_i}{b_i} \quad \text{- кросс-энтропия с фоном } b_i.$$

Преимущества **ММЭ** перед методом **TS-M-C-SAFT**:

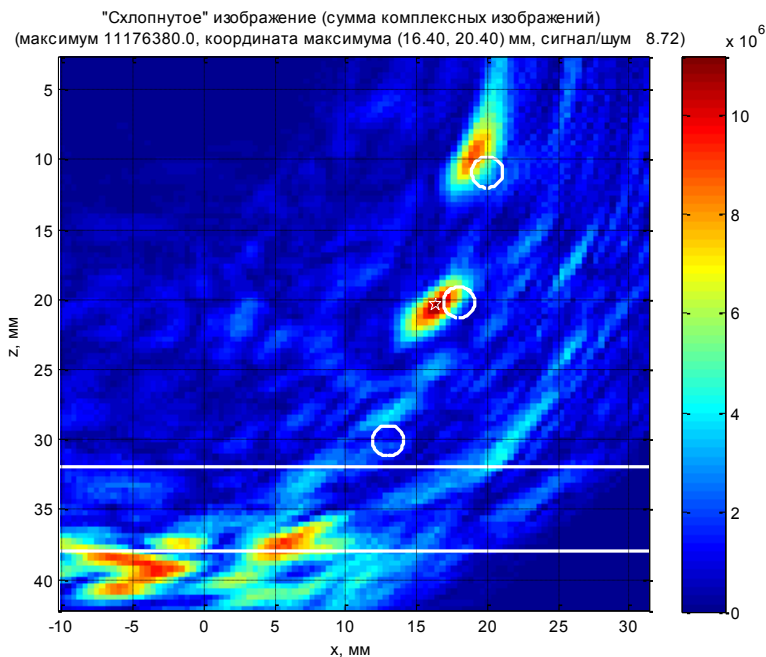
- Нет необходимости формировать множество парциальных изображений.
- Можно использовать менее 10% эхосигналов.
- Низкий уровень шума и высокая продольная и фронтальная разрешающая способность.



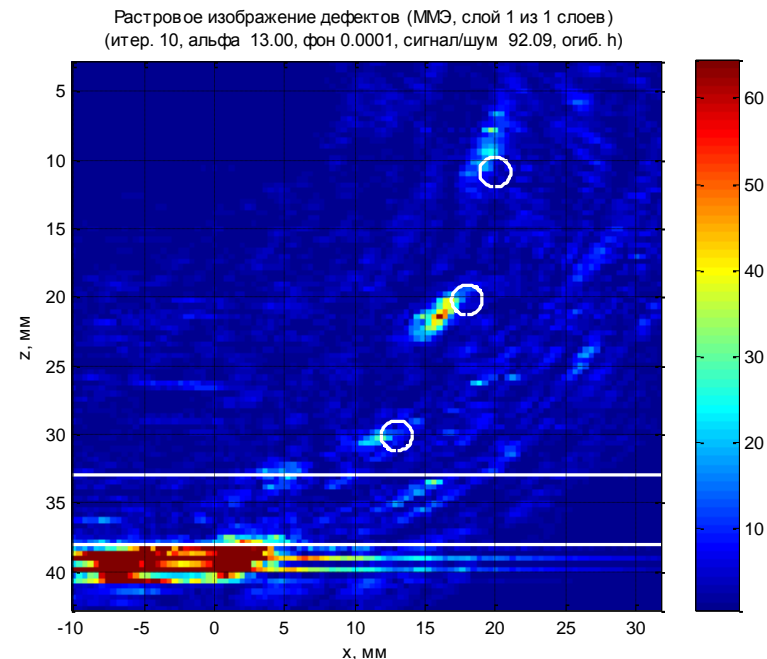
Слева показано изображение полученное методом **M-C-SAFT** трёх точечных отражателей (1.0, 0.5, 0.25) по трём акустическим схемам в присутствии белого шума 10%. Изображение справа получено **ММЭ**.

Повышение отношения сигнал/шум в материалах со структурным шумом

Корреляция (все эхосигналы)

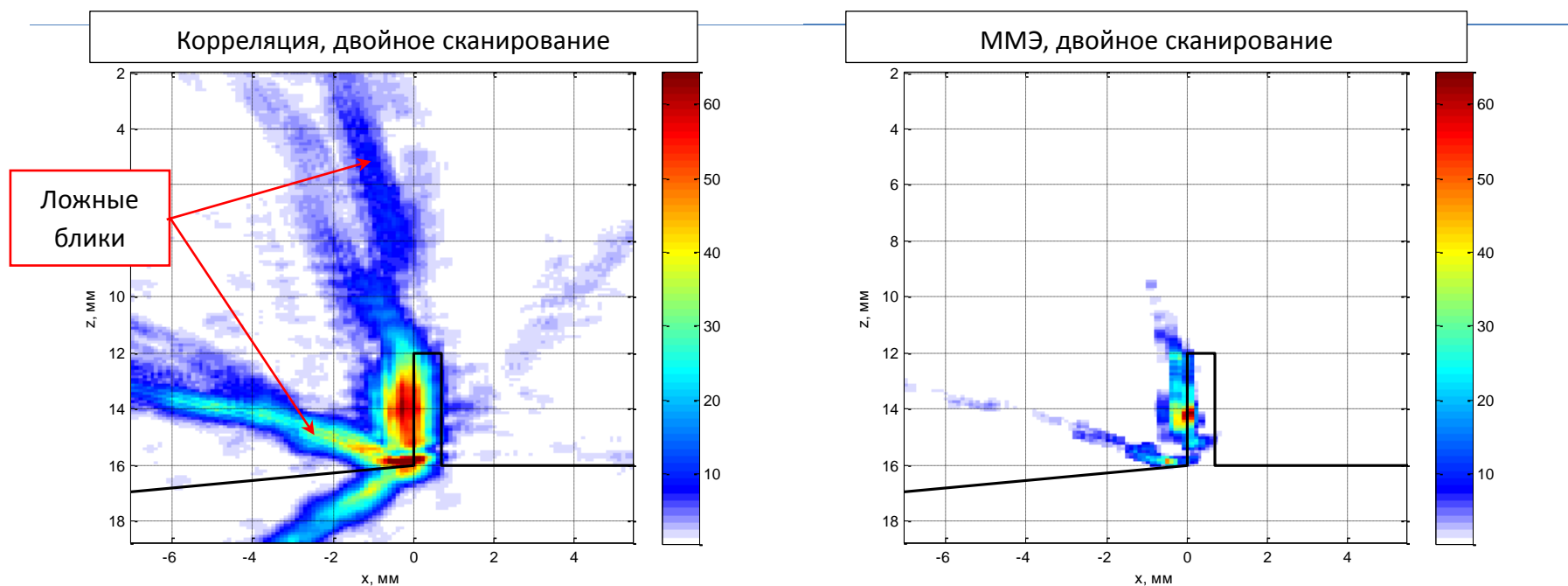


Корр ММЭ (7.5% от исходных эхосигналов)



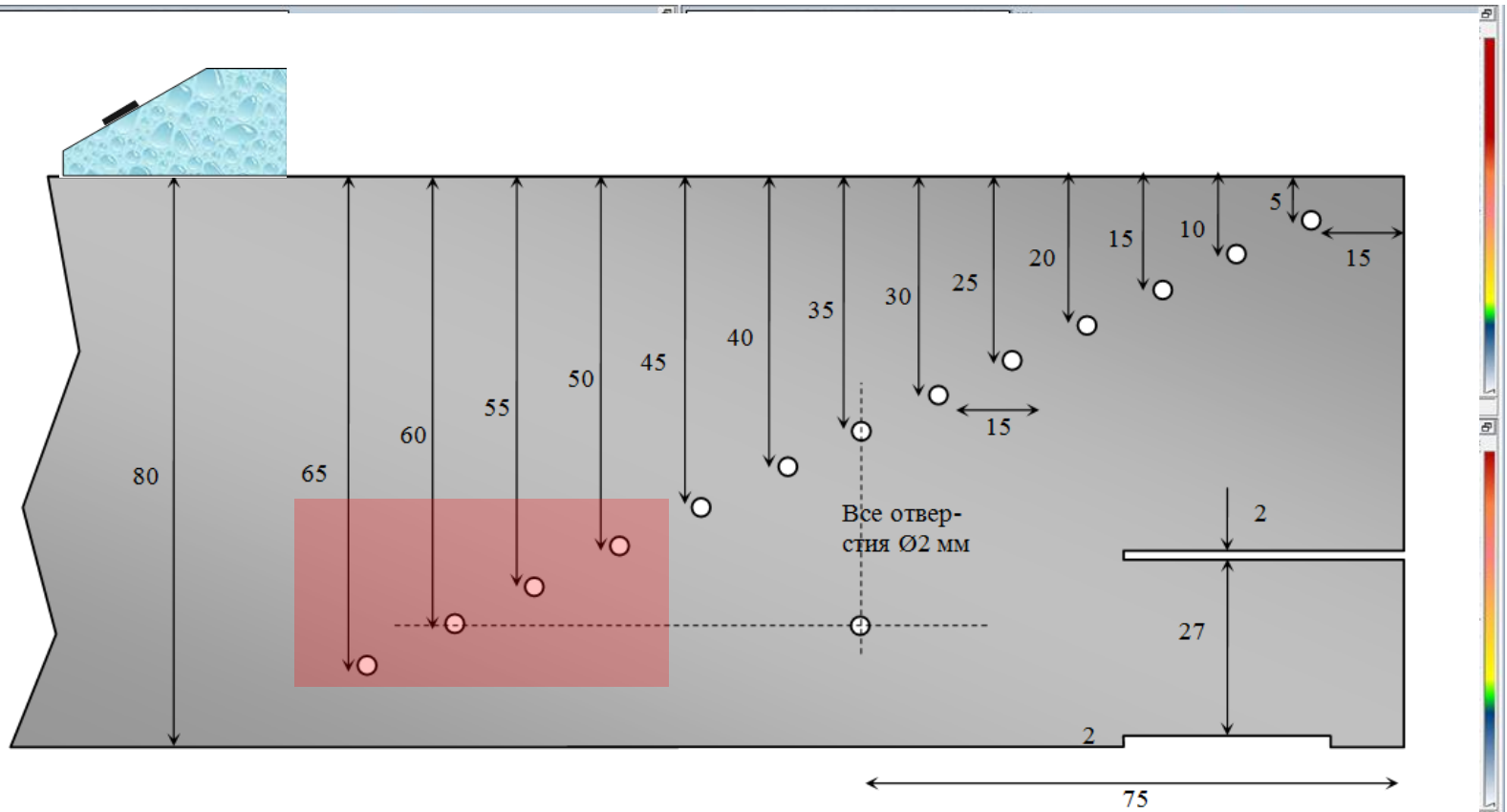
Изображение восстановленное ММЭ по акустической схеме **T(S)-T(S)** имеет разрешение выше в **два** раза, а отношение сигнал/шум больше на **20** дБ по сравнению с корреляционным изображением. ММЭ использовал только 7.5% эхосигналов.

Повышение разрешающей способности и отношения сигнал/шум



Изображение восстановленное ММЭ по акустическим схемам **T(S)-T(S)**, **T(S)-TB(SS)** и **TB(SS)-TB(SS)** имеет разрешение выше в **два** раза, а отношение сигнал/шум больше на **12** дБ по сравнению с корреляционным изображением. ММЭ использовал только 14% эхосигналов.

Повышение отношения сигнал/шум при использовании сложных сигналов



При регистрации использовался фазоманипулированный согласно 32-ух разрядной m-последовательности сигнал с центральной частотой 5 МГц.

Длина импульса после сжатия ММЭ уменьшилась более чем **в пять раз**, а уровень шума и «боковых лепестков» уменьшился больше чем **на 40 дБ**.

Выводы

Рассмотренные методы обработки эхосигналов реализованы в ЦФА-дефектоскопе **АВГУР-АРТ** и позволяют получать высококачественные изображения:

- по которым можно определить тип несплошности, что очень важно при автоматизации процесса распознавания её типа;
- с высокой разрешающей способностью, как в основной, так и в дополнительной плоскостях, что повышает точность измерения размеров отражателей;
- с низким уровнем шума и малыми амплитудами ложных бликов, что повышает достоверность проведения УЗК.

Восстановленные высококачественные изображения несплошностей могут использоваться для решения задач дефектометрии.

Благодарю за внимание!



Акустические схемы для улучшения качества

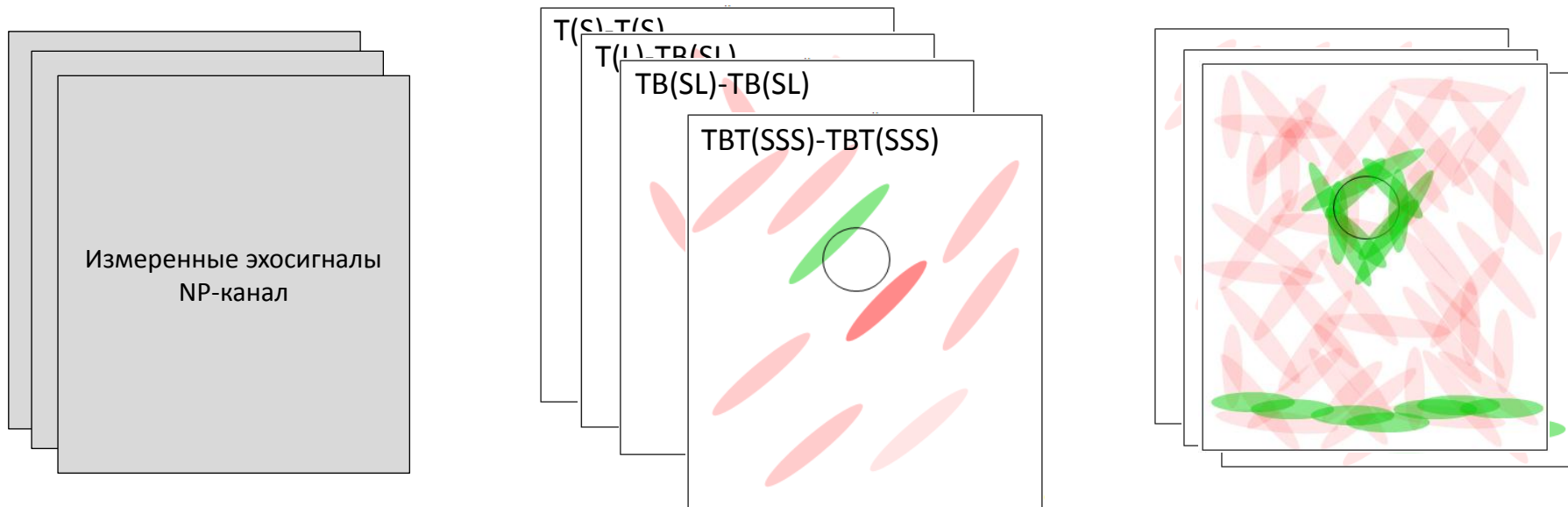
№	Пример название схемы	Схематическое изображение лучей акустической схемы	Комментарий
1.	T(S)-T(S) (T(L)-T(L)) ($m_t = 0; m_r = 0$)		Восстанавливается изображение корня и вершины трещины (на продольных волнах восстанавливается изображение дна объекта контроля)
2.	T(L)-TB(SL) ($m_t = 0; m_r = 1$)		Восстанавливается изображение поверхности трещины («самотандем»)
3.	TB(SL)-TB(SL) ($m_t = 1; m_r = 1$)		Восстанавливается изображение вершины трещины

Восстановление изображения по многим акустическим схемам

По измеренным эхосигналам $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ корреляционным методом восстанавливаются парциальные изображения несплошностей $\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; n_{as})$ в области восстановления изображения (ОВИ) для акустической схемы n_{as} .

Для расчёта семейства лучей заданной акустической схемы можно воспользоваться принципом Ферма или методом трассировки.

Методы семейства SAFT – это частный случай корреляционного метода.



$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{L_{as}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; n_{as}) \right| - \text{метод M-C-SAFT} \quad I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{L_{as}} \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s; n_{as}) \right| - \text{метод TS-M-C-SAFT}$$