

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОГЕРЕНТНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Е.Г. Базулин

При проведении ультразвукового контроля можно анализировать изображения отражателей, восстановленные методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА). Для повышения качества изображения отражателей вместо суммирования отсчетов эхосигналов по рассчитанным задержкам можно использовать коэффициент когерентности (CF) или знаковый коэффициент когерентности (SCF). Изображения, полученные с расчетом коэффициента когерентности, позволяют повысить отношение сигнал/шум и фронтальную разрешающую способность. В численных и модельных экспериментах показана эффективность восстановления CF- или SCF-изображения отражателей, как при регистрации эхосигналов обычными антенными решетками, так и прореженными (ПРАР), у которых расстояние между элементами больше длины волны.

Ключевые слова: антенная решетка, прореженная антенная решетка, двойное сканирование, тройное сканирование, C-SAFT, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), Coherence Factor (CF), Sign Coherence Factor (SCF).

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из способов проведения ультразвукового контроля заключается в восстановлении изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА). Чем выше отношение сигнал/шум и разрешающая способность изображения отражателей, тем точнее можно определить размеры и координаты залегания отражателей. А если удастся восстановить форму границы всего отражателя, то можно решить и задачу распознавания типа несплошности. Такое высококачественное изображение должно повысить достоверность ультразвукового контроля, для восстановления которого применяют методы, основанные на более точном учете эффектов распространения ультразвуковых импульсов в объекте контроля и их рассеивании на отражателях [1—5], и алгоритмы, использующие более сложные математические методы решения обратной задачи [6—11]. На данный момент решение обратной коэффициентной задачи для нужд медицинской томографии, предложенное в статье [12], можно рассматривать как наиболее точное и полное, но для проведения расчетов нужен суперкомпьютер или специализированный параллельный вычислитель.

Для повышения качества изображений, получаемых с помощью фазированных антенных решеток для медицинской ультразвуковой диагностики, была разработана технология адаптивного формирования луча [13, 14]. Данный подход основан на анализе коэффициента когерентности или знакового коэффициента когерентности участков эхосигналов, полученных фазированной антенной решеткой с применением динамической фокусировки по глубине. Технология адаптивного формирования луча достаточно проста и позволяет повысить отношение сигнал/шум более чем на 6 дБ и вдвое увеличить фронтальную разрешающую способность изображений, получаемых для целей медицинской ультразвуковой диагностики.

Применение данного подхода может оказаться полезным при ультразвуковом контроле промышленных объектов для обработки эхосигналов, измеренных антенной решеткой, работающей в режиме двойного или тройного сканирования. Его можно применять и при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным одноэлементным сканирующим преобразователем.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА КОГЕРЕНТНОСТИ

Пусть для измерения эхосигналов используется антенная решетка из N_e элементов, работающая в режиме двойного сканирования, когда регистрируются эхосигналы при излучении зондирующего импульса любым элементом с номером t антенной решетки и приемом эхосигнала любым элементом с номером r . Измеренные эхосигналы в комплексном формате обозначим как $p_{t,r}(t)$. Для получения изображения в точке $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i)$ области восстановления изображения (ОВИ) часто применяют метод ЦФА. Для этого нужно рассчитать задержки $t_{\text{del}}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r; as)$ и комплексные амплитуды

$p(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_r; as)$ импульса, отраженного от точечного рассеивателя в точке $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i)$ для заданной акустической схемы as при известных точках излучения $\mathbf{r}_l = (x_l, z_l)$ и приема $\mathbf{r}_r = (x_r, z_r)$. Под акустической схемой as будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса при отражении его от границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Для формирования изображения в точке $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i)$ из измеренных эхосигналов $p_{l,r}(t)$ извлекается массив комплексных значений

$$s_{l,r}(\mathbf{r}_i) = \int p_{l,r}(\tau) \delta(\tau - t_{\text{del}}(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r; as)) d\tau, \quad (1)$$

где $l = 1, 2, \dots, N_e$ — номер излучателя, а $r = 1, 2, \dots, N_e$ — номер приемника. Полученный массив $s_{l,r}(\mathbf{r}_i)$ длиной N_e^2 обычно когерентно складывают, и модуль полученного числа полагается изображением отражателя в точке $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i)$

$$\varepsilon(\mathbf{r}_i) = \sum_{r,l=1}^{N_e} S_{r,l}(\mathbf{r}_i). \quad (2)$$

Когда точка \mathbf{r}_i совпадает с местом расположения отражателя, то все значения массива $s_{l,r}(\mathbf{r}_i)$ будут иметь одинаковую фазу и сумма (2) будет максимальной. В противном случае, не только уменьшатся абсолютные значения элементов массива $s_{l,r}(\mathbf{r}_i)$, но они будут иметь разную фазу и сумма (2) уменьшится. С помощью антенной решетки на призме (рис. 1) в заданном положении на поверхности объекта контроля регистрируют эхосигналы и формируют изображение методом ЦФА по формуле (2) в ОВИ, отмеченной прямоугольником розового цвета. После чего антенную решетку можно перемещать вдоль осей y и x (направления указаны стрелками красного цвета) и изображение $|\varepsilon(\mathbf{r}_i)|$ сформируется для нового положения.

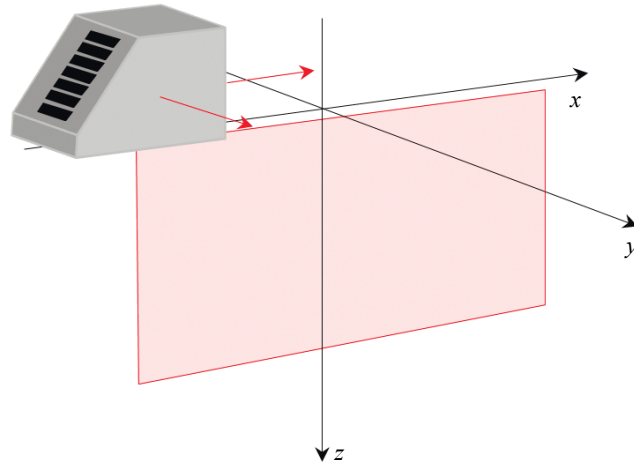


Рис. 1. Схема формирования трехмерного изображения методом ЦФА при использовании антенной решетки.

Конечно, формула (2) это не единственный способ формирования функции $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$. Например, от массива $s_{l,r}(\mathbf{r}_i)$ можно оставить только максимальное значение, найти его медиану или еще как-нибудь оценить его когерентность. Как упоминалось ранее, в медицинской диагностике для повышения качества изображений, полученных по ФАР-технологии, существует подход [13, 14], основанный на построении альтернативного изображения отражателей на основе расчета коэффициента когерентности

$$F_c(\mathbf{r}_i) = 1 - \sqrt{1 - \left(\left| \frac{\sum_{r,l} s_{r,l}(\mathbf{r}_i)}{\sum_{r,l} |s_{r,l}(\mathbf{r}_i)|} \right| \right)^2} \quad (3)$$

или знакового коэффициента когерентности

$$F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i) = 1 - \sqrt{1 - \left(\sum_{r,t} \text{sign}(\text{real}(s_{r,t}(\mathbf{r}_i))) / N_s \right)^2}, \quad (4)$$

где N_s — размер массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$, а оператор sign берёт знак реальной части комплексного массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$. Если использовать мнимую часть комплексного массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$, то по формуле, подобной (4), можно определить знаковый коэффициент когерентности $F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i)$. Если все элементы массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ имеют одну фазу, то выражения (3) и (4) стремятся к единице. И наоборот, если элементы массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ имеют разные фазы в интервале $[-\pi, \pi]$, то они будут стремиться к нулю, то есть $F_c(\mathbf{r}_i), F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i), F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i) \in [0, 1]$. Вид функций $F_c(\mathbf{r}_i)$, $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i)$ при переходе от полной когерентности массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ к полному рассогласованию фаз его элементов будет различным. Иногда для повышения разрешающей способности изображения когерентный множитель $F_c(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ возводится в степень γ .

Оценить вид функций $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ можно следующим образом. Пусть массив $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ состоит из ста отсчетов, каждый из которых может принимать значение ± 1 . Вид функций $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ определяется только количественным соотношением положительных и отрицательных единиц. Понятно, что если массив $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ состоит из одних единиц или отрицательных единиц, то сумма (2) экстремальна, а коэффициент когерентности (4) равен единице. Если число положительных и отрицательных единиц равно, то сумма элементов массива равна нулю, так же как и коэффициент корреляции. На рис. 2 показаны идеальные виды функций $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ (прямая штриховая линия), $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ (кривая линия) или $(F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i))^2$ (тонкая кривая линия) в зависимости от величины $\sum_{r,t} s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$. Видно, что функция $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ более контрастна, чем $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$. По этой причине формирование изображения с использованием $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ с одной стороны повысит разрешающую способность, а с другой — уменьшит уровень шумов. В результате качество изображения отражателей возрастет. Присутствие шумов и наличие на временной апертуре импульсов от нескольких отражателей, конечно, приведет к тому, что вид функций $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ будет сильно отличаться от идеального.

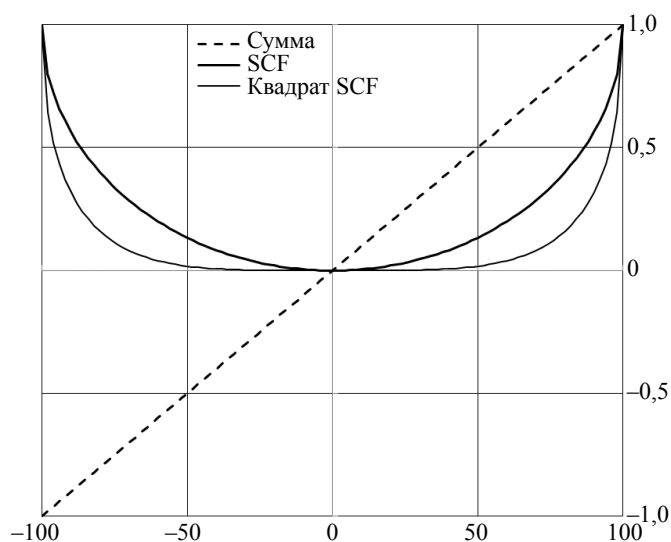


Рис. 2. Графики функций $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$, $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}^2(\mathbf{r}_i)$ в зависимости от величины $\sum_{r,t} s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$.

Оценить вид функции $F_c(\mathbf{r}_i)$ намного сложнее, так как он будет зависеть от амплитуды эхосигналов. Но ее график будет занимать промежуточное место между графиками $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$, и применение когерентного коэффициента $F_c(\mathbf{r}_i)$ также должно повысить качество изображения

отражателей. Так как функция $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i)$ имеет осциллирующий вид, то далее в статье под когерентным знаковым коэффициентом будет подразумеваться выражение

$$F_{sc}(\mathbf{r}_i) = \left| F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i) + i \cdot F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i) \right|. \quad (5)$$

Функция $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$, в отличие от функций $F_{sc}^{re}(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}^{im}(\mathbf{r}_i)$, имеет гладкий вид.

Сами по себе функции $F_c(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ можно рассматривать как альтернатива изображению $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$, формируемому по формуле (2). Но в [13, 14] предлагается анализировать изображения типа:

$$I_c(\mathbf{r}_i) = |\varepsilon(\mathbf{r}_i)| F_c(\mathbf{r}_i) \quad \text{или} \quad I_{sc}(\mathbf{r}_i) = |\varepsilon(\mathbf{r}_i)| F_{sc}(\mathbf{r}_i). \quad (6)$$

Такой подход обоснован, если коэффициенты когерентности $F_c(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ равны единице в тех точках, где есть отражатели независимо от их отражающей способности, и равны нулю там, где отражателей нет (рис 2). Поэтому изображение, полученное по формуле (6), сохранит амплитуды бликов отражателей исходного изображения, полученного по формуле (2), и повысит разрешающую способность и уменьшит уровень шума. К сожалению, на практике такая ситуация будет исключением! Дело в том, что величина коэффициента когерентности зависит от особенностей излучения и приема антенной решетки, расположения отражателей, их индикатрисы рассеивания и уровня шума в измеренных эхосигналах. Это приведет к тому, что коэффициенты когерентности не будут достигать единицы, и изображение по формуле (6) будет напоминать изображение, полученное по формуле $|\varepsilon(\mathbf{r}_i)|^2$. Понятно, что такое изображение будет демонстрировать очень высокое отношение сигнал/шум, но блики малой амплитуды могут стать исчезающе малы. Можно поступить аккуратнее и находить изображение по формулам:

$$I_c(\mathbf{r}_i) = \sqrt{|\varepsilon(\mathbf{r}_i)| F_c(\mathbf{r}_i)} \quad \text{или} \quad I_{sc}(\mathbf{r}_i) = \sqrt{|\varepsilon(\mathbf{r}_i)| F_{sc}(\mathbf{r}_i)}. \quad (7)$$

Но и при таком подходе неизбежно искажение амплитуд бликов, так как не факт, что коэффициент когерентности будет равен единице в точках расположения отражателей.

Измерение эхосигналов антенной решеткой в режиме двойного сканирования в нескольких пространственных точках называется режимом тройного сканирования [4]. В этом случае антенная решетка может перемещаться и вдоль оси x (см. рис. 1). Так как функция $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ комплексная, то для повышения качества изображения достаточно когерентно сложить парциальные изображения

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \varepsilon(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \right|, \quad (8)$$

где $\varepsilon(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ рассчитывается по формуле (2) для каждого положения антенной решетки, \mathbf{r}_w — вектор, указывающий на переднюю грань призмы.

Коэффициенты когерентности $F_c(\mathbf{r}_i)$ или $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ положительны, что делает невозможным когерентное накопление изображения отражателей при совместной обработке эхосигналов для нескольких положений антенной решетки. Однако расчёт $F_c(\mathbf{r}_i)$ можно модифицировать следующим образом:

$$F_c^\pm(\mathbf{r}_i) = \text{sign} \left(\sum_{r,t} s_{r,t}(\mathbf{r}_i) \right) F_c(\mathbf{r}_i). \quad (9)$$

Но можно поступить более изящным способом. Если измерения проводились N_w раз при перемещении антенной решетки на призме по поверхности объекта контроля, то суммарное изображение можно найти как коэффициент когерентности $F_c(\mathbf{r}_i)$ по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = F_c(\mathbf{r}_i) = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sum_{w=1}^{N_w} \sum_{r,t=1}^{N_r} s_{r,t}^{(w)}(\mathbf{r}_i)}{\sum_{w=1}^{N_w} \sum_{r,t=1}^{N_r} |s_{r,t}^{(w)}(\mathbf{r}_i)|} \right)^2}; \quad (10)$$

$$s_{r,t}^{(w)}(\mathbf{r}_i) = \int p_{r,t}^{(w)}(\tau) \delta(\tau - t_{\text{del}}(\mathbf{r}_{t,w}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{r,w}; as)) d\tau,$$

где $\mathbf{r}_{t,w} = (x_{t,w}, z_{t,w})$ — точка излучения импульса, $\mathbf{r}_{r,w} = (x_{r,w}, z_{r,w})$ — точка приёма эхосигнала. Формула для расчёта функции $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ аналогична (10) с учётом (5).

3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В дальнейшем (для повышения лаконичности текста) изображения, полученные методом ЦФА по формуле (2), будут называться ЦФА-изображениями, полученные по формулам (6) — ЦФА-CF- или ЦФА-SCF-изображениями, а оценка их по формулам (3) или (5) — CF- или SCF-изображениями соответственно.

3.1. Поперечный срез изображения точечного отражателя

Для оценки разрешающей способности изображения были рассчитаны эхосигналы от точечного отражателя на глубине 30 мм для антенной решетки из 32 элементов с шагом 0,5 мм. На рис. 3 показан поперечный срез изображения, восстановленного как $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$, $F_c(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$. В соответствии

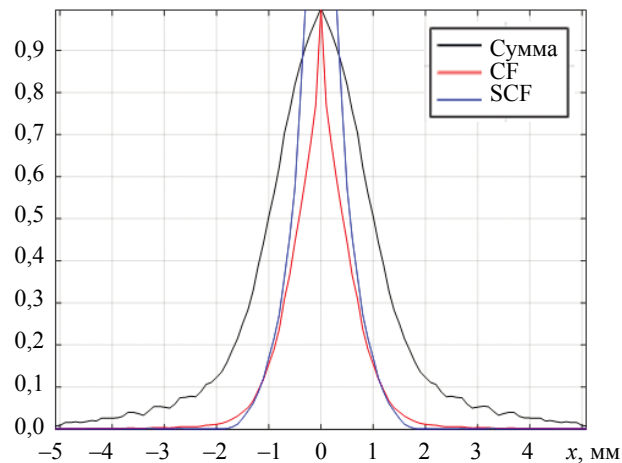


Рис. 3. Поперечный срез изображения точечного рассеивателя, восстановленного как $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$, $F_c(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$.

с видом графиков на рис. 2, CF-изображение (линия красного цвета) или SCF-изображение (линия синего цвета) имеют разрешающую способность примерно в два раза больше чем $\varepsilon(\mathbf{r}_i)$ (линия чёрного цвета). SCF-изображение имеет плоскую вершину, так как при небольшом изменении координаты x все элементы массива $s_{r,t}(\mathbf{r}_i)$ не успевают изменить знак.

3.2. Три точечных отражателя

В следующем численном эксперименте восстанавливались изображения по эхосигналам, рассчитанным для точечных отражателей с коэффициентами отражения (1,0; 0,5; 0,1), расположенных на разных глубинах 28, 30 и 32 мм. Антенная решетка без призмы из 32 элементов с шагом 0,5 мм была расположена вдоль оси x симметрично точки $x = 0$ мм. Блики на ЦФА-изображении имеют разные амплитуды, сохраняющие соотношение между коэффициентами отражения. Однако на CF- и SCF-изображениях блики отражателей разной силы имеют одинаковые амплитуды, так как эхосигналы от отражателей не пересекаются и не мешают рассчитывать коэффициент корреляции для каждого из отражателей.

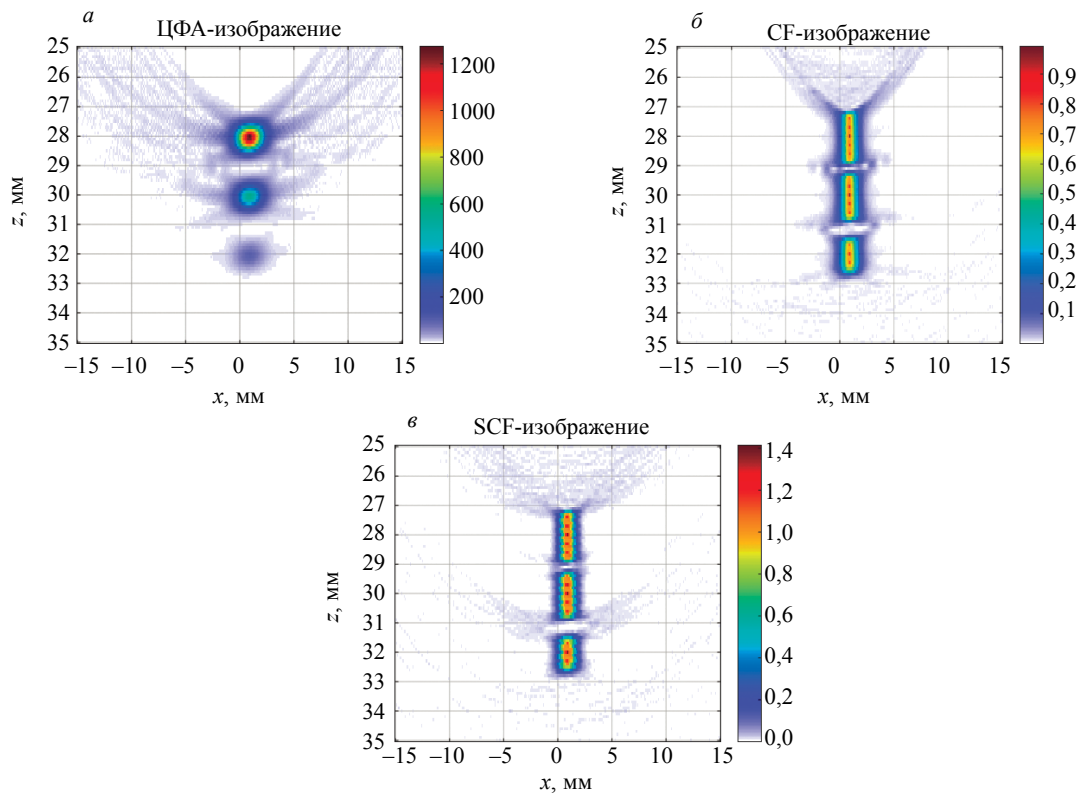


Рис. 4. ЦФА-, CF- и SCF-изображения трех точечных отражателей, расположенных на разных глубинах.

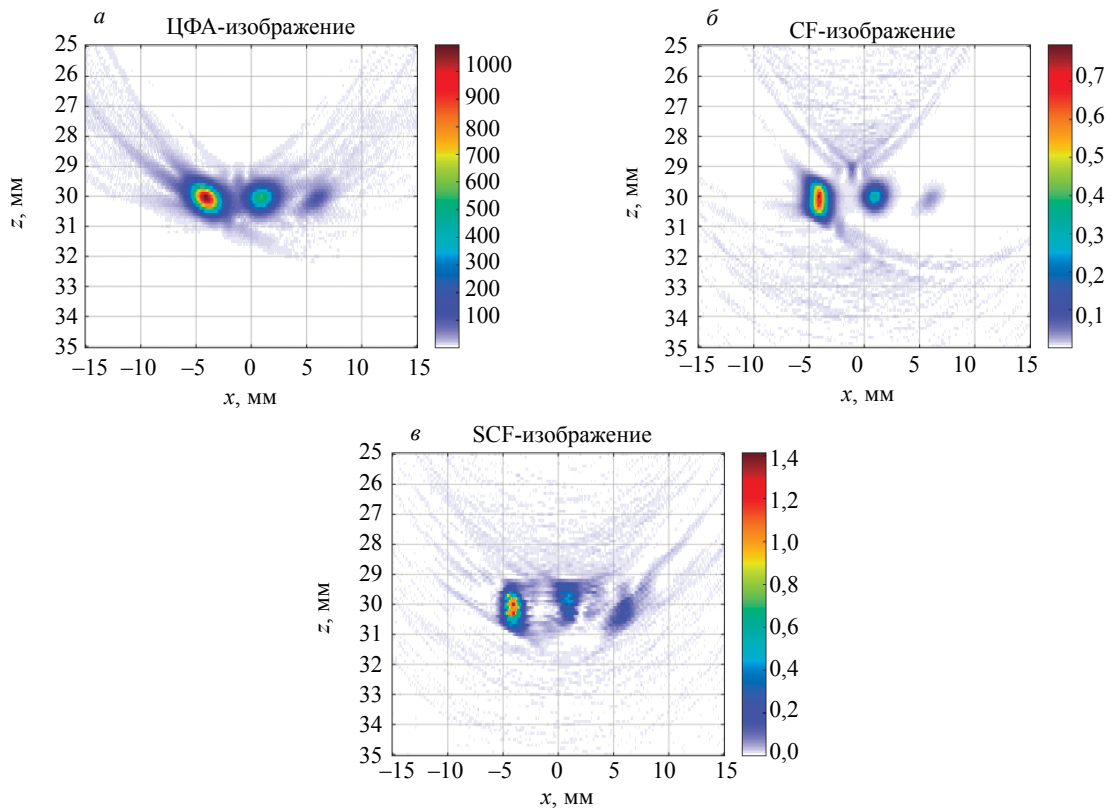


Рис. 5. ЦФА-, CF- и SCF-изображения трех точечных отражателей, расположенных на одной глубине.

Но если импульсы от отражателей будут пересекаться (это произойдет при расположении точечных отражателей в разных точках по оси x на одной глубине 30 мм), то блики отражателей на CF- и SCF-изображениях будут иметь разные амплитуды (в отличие от изображения на рис. 4).

В целом можно сделать неутешительный вывод: если оценка коэффициента корреляции происходит не по эхосигналам от одного отражателя, а по смеси с эхосигналами от нескольких отражателей, то коэффициенты корреляции не будут равны единице (см. рис. 4, 5). Формирование CF-ЦФА- и SCF-ЦФА-изображений по формулам (6) еще больше усилит разницу в амплитуде бликов. К сожалению, данная ситуация крайне сложно прогнозируется и добиться того, чтобы функции $F_c(\mathbf{r}_i)$ и $F_{sc}(\mathbf{r}_i)$ достигали единицы в местах расположения отражателей, является нетривиальной задачей. Однако при создании конкретных методик это обстоятельство может быть учтено.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием ЦФА-дефектоскопа АВГУР-АРТ, разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+».

4.1. Тест перерасеивания, измерения прореженной антенной решеткой

Рассмотренную технологию повышения качества изображения было интересно испытать при обработке эхосигналов, измеренных прореженной антенной решеткой, у которой шаг между элементами много больше длины волны. Такие антенные решетки позволяют повысить разрешающую способность изображения, однако возрастает шум, вызванный грубым шагом между элементами. Применение ПРАР особенно эффективно для совместной обработки эхосигналов при ее механическом сканировании [15].

На рис. 6 приведено схематическое изображение дюралюминиевого теста перерасеивания толщиной $h = 90$ мм с 12-ю боковыми отверстиями диаметром 0,5 мм, просверленные на глубину 30 мм. Группа отверстий, между которыми расстояние около 2 мм, расположена на глубине около 39 мм. Между отверстиями двух других групп расстояния примерно равны 6 и 8 мм. Для регистрации эхосигналов использовали прореженную антенную решетку (рабочая частота 5 МГц, 32 элемента, ширина элемента 0,75 мм, зазор между элементами 1,25 мм), установленную на призму из рексолита (угол наклона 17 град, стрела 55 мм, пробег по призме по центральному лучу 14,5 мм).

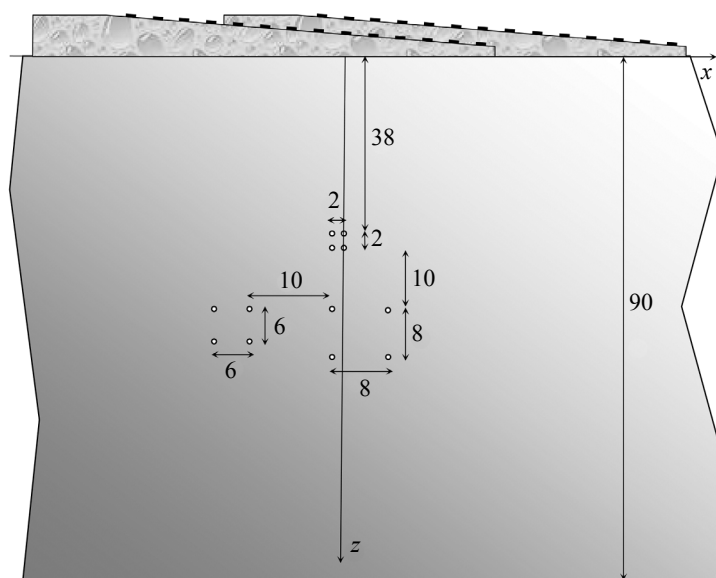


Рис. 6. Схематическое изображение теста перерасеивания начального и конечного положений ПРАР при сканировании вдоль оси x .

В данном разделе описываются результаты обработки эхосигналов, измеренных ПРАР при ее перемещении по поверхности образца 5 раз с шагом 10 мм, начиная с точки 57 мм (по передней грани призмы). Положения ПРАР (первое и пятое) схематически показаны на рис. 6.

4.1.1. Продольная волна

На рис. 7 приведены ЦФА-, CF- и ЦФА-CF-изображения, восстановленные на продольной волне по экосигналам, измеренным ПРАР в четвертом положении, когда координаты передней грани призмы были равны -27 мм. CF-изображения по сравнению с ЦФА-изображением обладают более высоким качеством, так как средний уровень шума уменьшился на 7 дБ, ложные блики из-за грубого шага между элементами ПРАР стали менее заметны, и примерно в 1,5 раза возросло фронтальное разрешение изображения. Соотношение амплитуд бликов отверстий бокового сверления в целом сохранился. С формальной точки зрения самым высоким качеством обладает ЦФА-CF-изображение. И действительно по сравнению с ЦФА-изображением отношение сигнал/шум возросло на 21 дБ, а фронтальная разрешающая способность — не менее чем в два раза. Однако амплитуды бликов трех отверстий бокового сверления левой нижней группы уменьшились более чем в два раза.

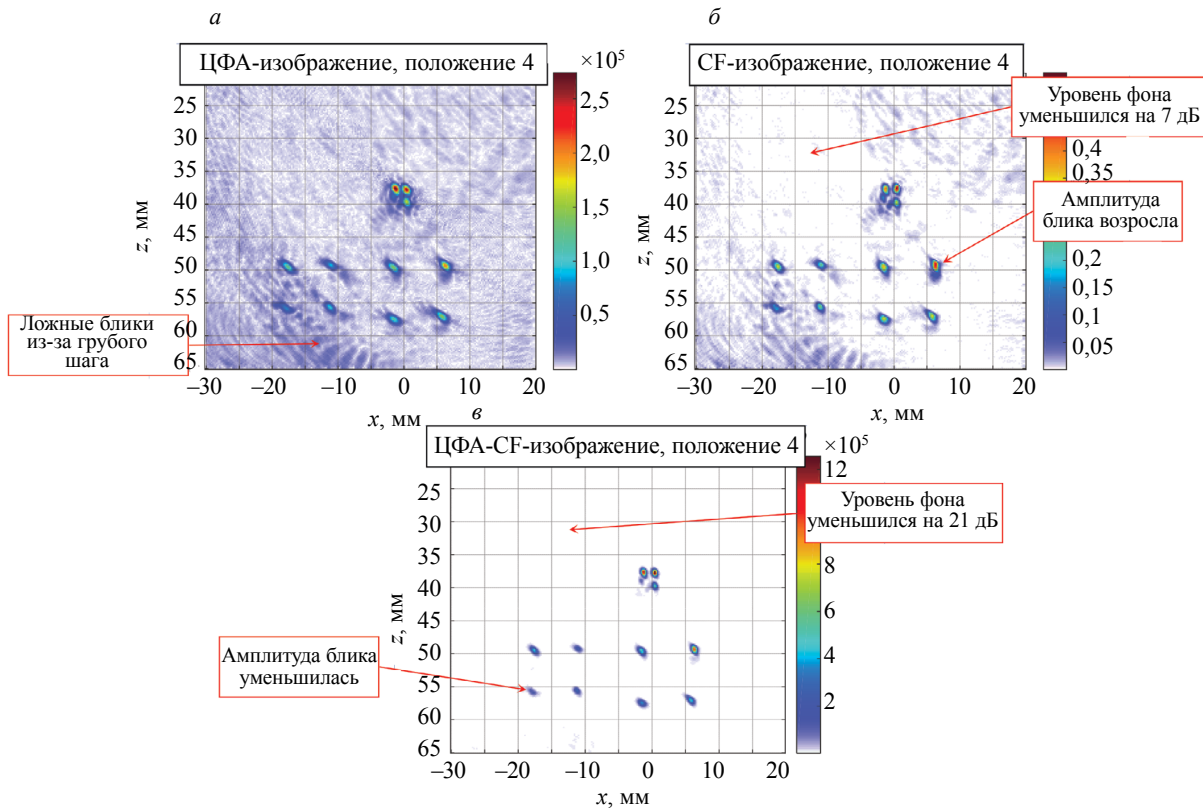


Рис. 7. ЦФА-, CF- и ЦФА-CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные на продольной волне, для положения 4 (-27 мм).

На рис. 8 показаны ЦФА- и CF-изображения отверстий бокового сверления как сумма парциальных изображений для пяти положений ПРАР. На когерентной сумме парциальных ЦФА-изображений средний уровень шума уменьшился на 5 дБ по сравнению с ЦФА-изображением на рис. 7а, а ложные блики из-за грубого шага между элементами ПРАР уменьшили амплитуду не менее чем на 6 дБ. Сумма положительно определенных парциальных CF-изображений не привела к заметному повышению качества изображения. Так как апертура антенной решетки равна 63 мм, а апертура сканирования ПРАР — 40 мм, то на суммарном изображении повышение фронтального разрешения не очень заметно, особенно на таких глубинах.

Однако если для совместной обработки экосигналов воспользоваться формулой (10), то качество CF-изображения (рис. 9а) заметно возрастает: отношение сигнал/шум — на 7 дБ (по сравнению с изображением на рис. 8б), а фронтальная разрешающая способность — не менее чем в 1,5 раза. Очень важно и то, что амплитуды бликов в целом сохранили свои относительные амплитуды. На рис. 9б показано ЦФА-CF-изображение, полученное по пяти положениям антенной решетки, то есть как поэлементное умножение а и б изображений на рис. 8.

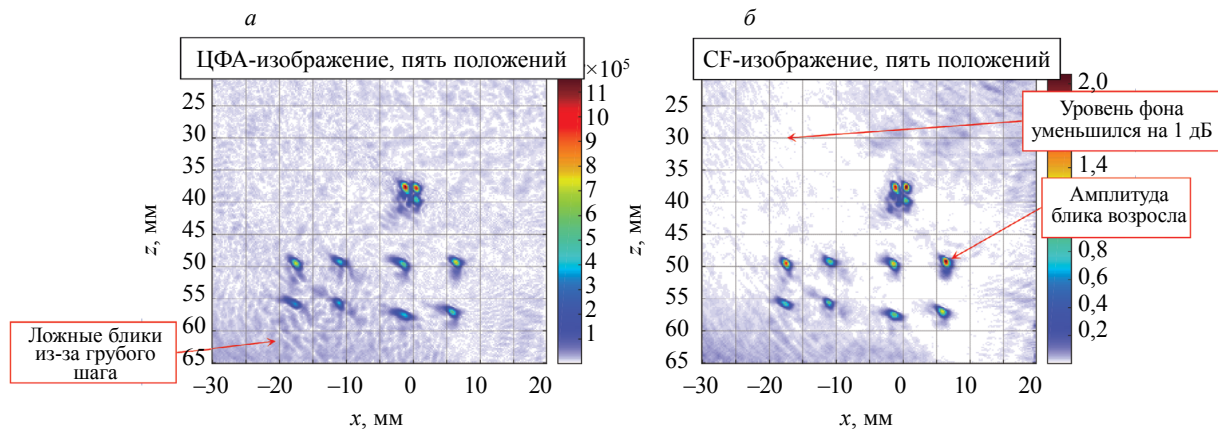


Рис. 8. ЦФА- и CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные на продольной волне, как сумма парциальных изображений для пяти положений ПРАР.

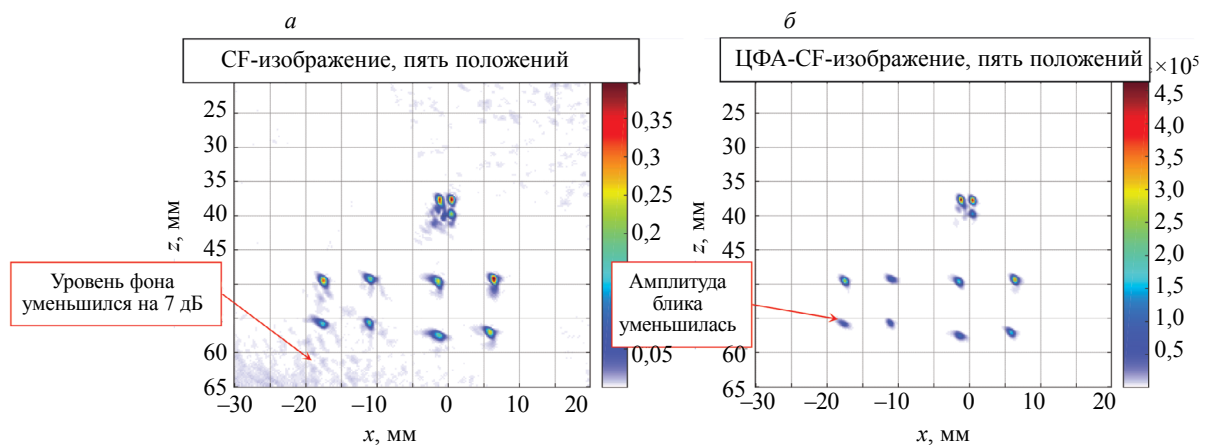


Рис. 9. CF- и ЦФА-CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные по пяти положениям ПРАР на продольной волне.

На рис. 10а показано SCF-изображение отверстий бокового сверления, восстановленное на продольной волне по эхосигналам четвертого положения ПРАР. По сравнению с CF-изображением на рис. 7б отношение сигнал/шум возросло на 6 дБ, и незначительно повысилась фронтальная разрешающая способность. На рис. 10б показано SCF-изображение,

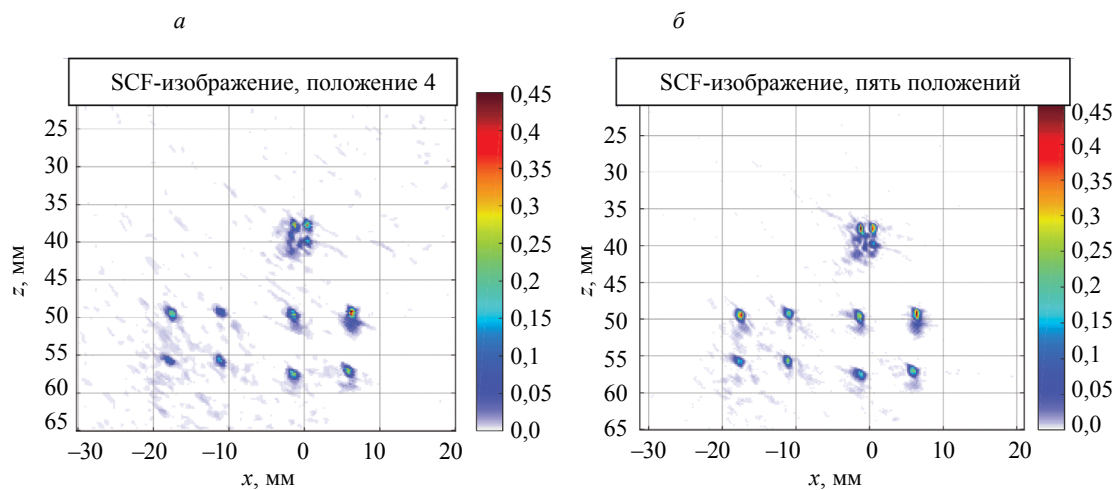


Рис. 10. SCF-изображения на продольной волне отверстий бокового сверления, восстановленные по четвертому положению ПРАР (а) и по пяти положениям (б).

восстановленное на продольной волне по экосигналам в пяти положениях антенной решетки по формуле (10), которое незначительно отличается от CF-изображения по пяти положениям, представленным на рис. 9а.

4.1.2. Поперечная волна

Не смотря на то, что призма была предназначена для работы на продольной волне, можно восстановить изображения отражателей по уже измеренным экосигналам, но по акустической схеме, предполагающей излучение и прием на поперечной волне. На рис. 11 показаны ЦФА-, CF- и ЦФА-CF-изображения, восстановленные на поперечной волне по экосигналам, измеренным ПРАР в четвертом положении, когда координаты передней грани призмы были равны -27 мм. ЦФА-изображение из-за высокого уровня шумов вследствие грубого шага между элементами ПРАР и высокого уровня реверберационных шумов (так как призма была рассчитана на работу с продольной волной) очень низкого качества. CF-изображение (по сравнению с ЦФА-изображением) обладает более высоким качеством, так как средний уровень шума уменьшился на 13 дБ, ложные блики из-за грубого шага между элементами ПРАР и реверберационный шум стали менее заметны, и примерно в 1,5 раза возросло фронтальное разрешение изображения. Соотношение амплитуд бликов отверстий бокового сверления в целом сохранился. С формальной точки зрения самым высоким качеством обладают ЦФА-CF-изображения. И действительно (по сравнению с ЦФА-изображением) отношение сигнал/шум возросло на 29 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла не менее чем в два раза. Однако амплитуда бликов трех отверстий бокового сверления левой нижней группы уменьшилась более чем в два раза.

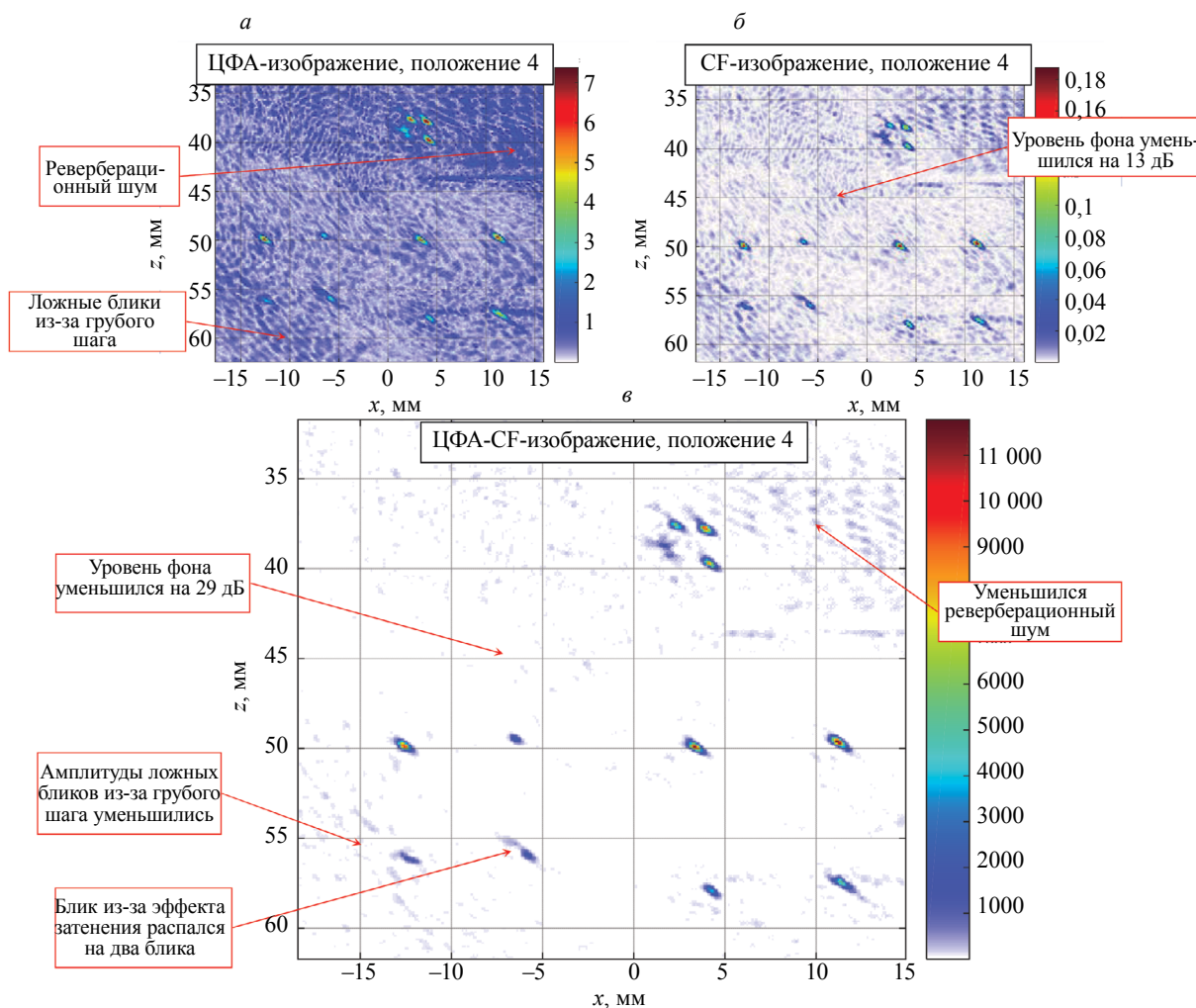


Рис. 11. ЦФА-, CF- и ЦФА-CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные на поперечной волне, для положения 4 (-27 мм).

На рис. 12 показаны ЦФА- и CF-изображения отверстий бокового сверления как сумма парциальных изображений, восстановленных на поперечной волне, для пяти положений ПРАР. На когерентной сумме парциальных ЦФА-изображений средний уровень шума уменьшился на 4 дБ по сравнению с ЦФА-изображением на рис. 11а, а ложные блики из-за грубого шага между элементами ПРАР уменьшили амплитуду не менее чем на 6 дБ. Сумма положительно определенных парциальных CF-изображений не привела к заметному повышению качества изображения.

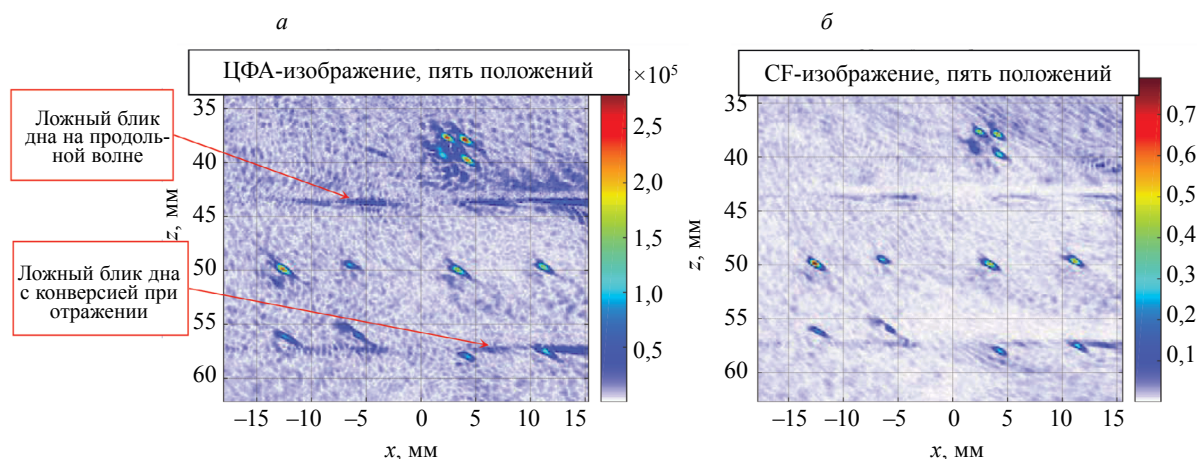


Рис. 12. ЦФА- и CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные на поперечной волне, как сумма парциальных изображений для пяти положений.

Однако если для совместной обработки эхосигналов воспользоваться формулой (10), то качество CF-изображения (рис. 13а) заметно возросло, так как (по сравнению с изображением на рис. 12б) отношение сигнал/шум увеличилось на 11 дБ. Фронтальная разрешающая способность CF-изображения практически не изменилась. Очень важно и то, что амплитуды бликов сохранили свои относительные амплитуды. На рис. 13б показано ЦФА-CF-изображение, полученное по пяти положениям антенной решетки, то есть как поэлементное умножение а и б изображений на рис. 12.

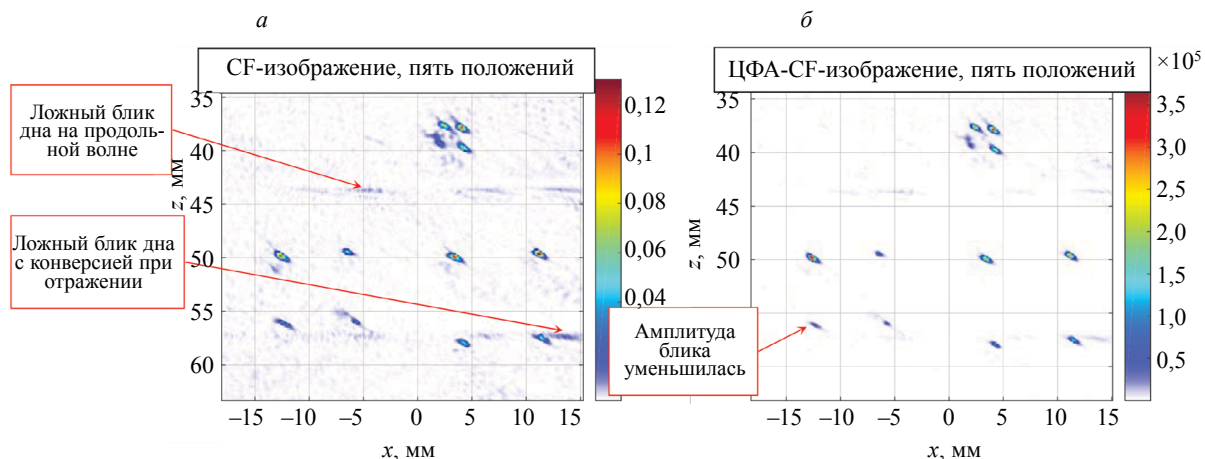


Рис. 13. CF- и ЦФА-CF-изображения отверстий бокового сверления, восстановленные по пяти положениям ПРАР на поперечной волне.

На рис. 14а показано SCF-изображение отверстий бокового сверления, восстановленное на поперечной волне по эхосигналам четвертого положения ПРАР. По сравнению с CF-изображением на рис. 12б отношение сигнал/шум возросло на 6 дБ, и незначительно повысилась фронтальная разрешающая способность, а ложные блики дна образца и реверберационных шумов практически исчезли. На рис. 14б показано SCF-изображение, восстановленное на поперечной волне по формуле (10) по эхосигналам в пяти положениях. И хотя его отношение

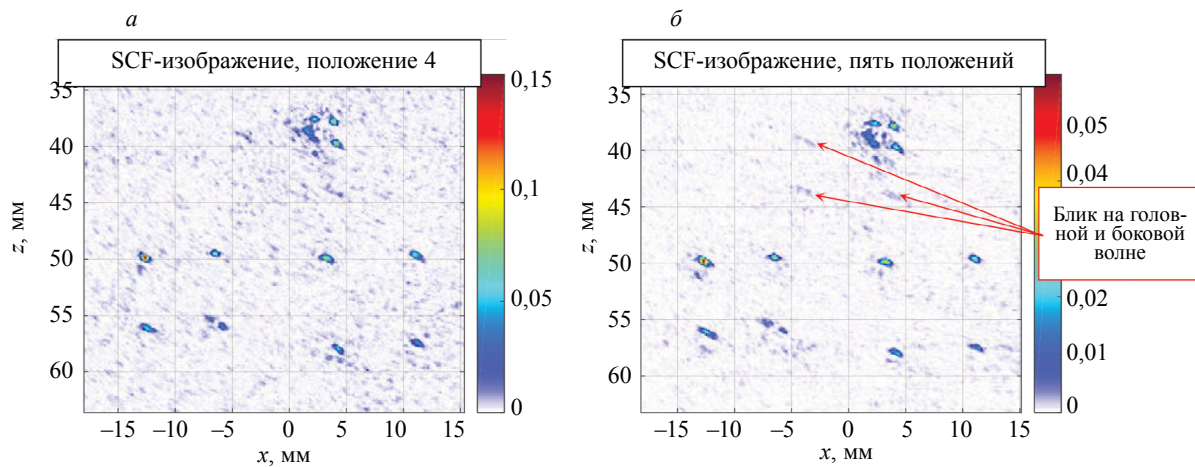


Рис. 14. SCF-изображения на поперечной волне отверстий бокового сверления, восстановленные по четвертому положению ПРАР (а) и по пяти положениям (б).

сигнал/шум примерно такое же, что и у CF-изображения по пяти положениям на рис. 13а, на нем практически исчезли ложные блики дна, сформированные импульсами продольной волны и импульсами, изменившими тип волны при отражении от дна. Однако на SCF-изображении стали заметны ложные блики отражателей левой нижней группы отверстий бокового сверления (см. рис. 6), сформированные эхосигналами головной и боковой волн [16]. На других изображениях эти блики не заметны.

4.2. Плоскодонные отверстия разного диаметра на одной глубине

Как видно из результатов, изложенных в предыдущем разделе, SCF-изображение отверстий бокового сверления в сравнении с CF-изображением имеет более высокую разрешающую способность и отношение сигнал/шум. Это можно объяснить тем, что работа со знаковым коэффициентом когерентности при малом уровне шума увеличивает эффективную апертуру, на которой видны импульсы от отверстия бокового сверления, так как его индикатриса рассеивания относительно равномерна. А вот восстановление SCF-изображений плоскостных отражателей, индикатриса рассеивания которых имеет ярко выраженный максимум, может привести к уменьшению эффективной апертуры и, следовательно, к ухудшению качества изображения. Для проверки этих соображений был проведен модельный эксперимент по восстановлению изображений плоскодонных отверстий диаметром 4,5; 3,2; 2,3 и 1,6 мм на глубине около 22 мм и с углом наклона 45 град.

Для регистрации эхосигналов использовали ПРАР и призму (см. раздел 4.1) при ее перемещении по поверхности образца 5 раз с шагом 20 мм, начиная с точки 116 мм. На рис. 15 (левый столбец) приведены ЦФА-, CF- и SCF-изображения отверстий четырех плоскодонных отверстий, восстановленные по пяти положениям ПРАР на продольной волне. На правом столбце показаны фрагменты левого столбца. Линиями черного цвета на изображения нанесены контуры плоскодонных отверстий и граница образца. Видно, что уровень шума ЦФА-изображения, связанный с грубым шагом между элементами ПРАР, на 10 дБ больше, чем у CF- и SCF-изображений. Уровень этого шума можно дополнительно уменьшить более чем на 10 дБ, если регистрировать эхосигналы в режиме тройного сканирования с более мелким шагом 2 мм. Но в этом случае на порядок возрастут объем измеренных эхосигналов и время формирования ЦФА-изображения. Форма бликов CF-изображения точнее соответствуют форме дна плоскодонных отверстий, чем форма бликов SCF-изображения, а на блике дна хорошо заметны тени от дна отверстий. На SCF-изображении блик дна отверстия самого большого диаметра распадается на два блика, соответствующие его краям, дифракционное рассеивание на которых более равномерно в сравнении с индикатрисой рассеивания дна. На SCF-изображении имеются ложные блики, сформированные эхосигналами после перерассеивания и трансформации типа волны.

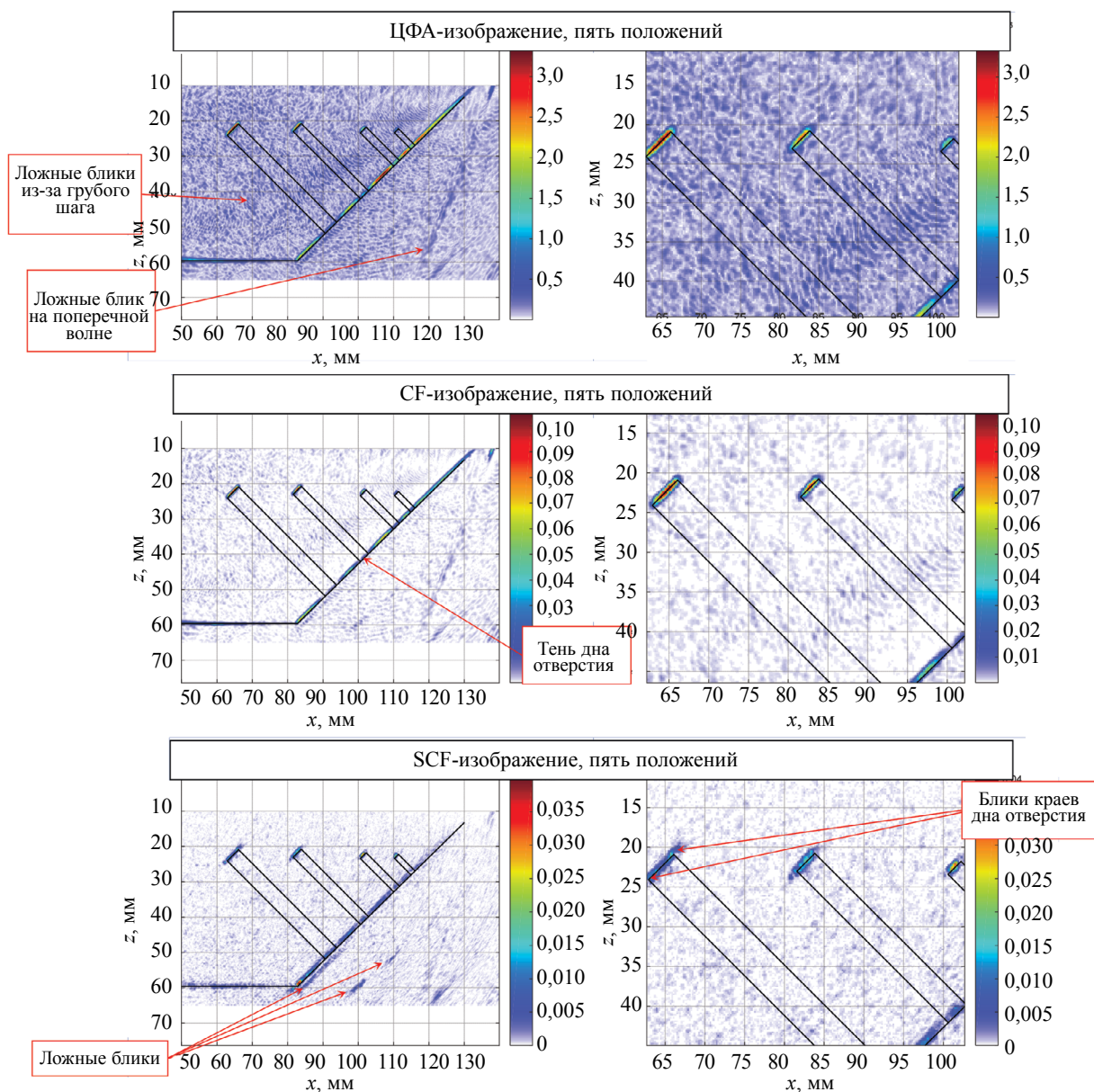


Рис. 15. ЦФА-, CF- и SCF-изображения (столбец слева) четырех плоскдонных отверстий, восстановленные по пяти положениям ПРАР. В правом столбце показаны фрагменты изображений левого столбца.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

Получение изображений по формуле (6) как произведение ЦФА- и CF- или SCF-изображений уменьшает уровень шума и повышает фронтальную разрешающую способность изображения отражателей, но может существенно уменьшить амплитуды бликов отражателей малой силы. Поэтому для распознавания типа несплошности более корректно анализировать CF- или SCF-изображения.

SCF-изображения лучше восстанавливают блики отражателей с примерно равномерной индикатрисой рассеивания (см. рис. 10), например, отверстия бокового сверления, но при этом образ плоских отражателей может исказиться (см. рис. 15).

Для расчета знакового коэффициента когерентности при формировании SCF-изображения лучше пользоваться формулой (5).

Изображения, полученные при анализе коэффициента когерентности, имеют меньший уровень реверберационных шумов (см. рис. 11). Особенно хороший результат получился для SCF-изображения на поперечной волне (см. рис. 14а).

Восстановление CF- или SCF-изображений по эхосигналам, измеренным ПРАР, уменьшает уровень ложных бликов, связанных с грубым шагом между элементами (см. рис. 7, 11).

Применение формулы (10) оказалось очень эффективным для восстановления CF- или SCF-изображений по эхосигналам, измеренным ПРАР в режиме тройного сканирования.

Разработка специализированных методик ультразвукового контроля с анализом CF- или SCF-изображений отражателей должна повысить достоверность ультразвукового контроля.

Модификация программного обеспечения, предназначенного для восстановления ЦФА-изображений с целью получать CF- или SCF-изображения, незначительная.

Автор выражает благодарность сотрудникам «Научно-производственного центра «ЭХО+»: А.В. Бутову — за инициализацию работы по адаптивному формированию луча, за идею о расчете совместного коэффициента корреляции для разных акустических схем, которая была трансформирована для расчета коэффициента корреляции для нескольких положений антенной решетки, за многочисленные замечания по тексту статьи, которые были учтены автором; С.А. Коколеву — за предварительное изучение проблемы.

ООО «Научно-производственный
центр «ЭХО+»
Москва

Поступила в редакцию
7 февраля 2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Connolly G.D. Modelling of the propagation of ultrasound through austenitic steel welds. UK Research Centre in NDE (RCNDE). Department of Mechanical Engineering Imperial College. — London, SW7 2AZ, August 2009, p. 206.
2. Schallert R., Heilmann P., Scholz H., Schubert F., Barth M., Fröhlich M. Phased array techniques for an optimized inspection of dissimilar welds. — 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16—20 April 2012, Durban, South Arica, URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/149_wcndtfinal00149.pdf (дата обращения: 25.01.2017).
3. Darmon M., Chatillon S., Mahaut S., Calmon P., Fradkin L.J., Zernov V. Recent advances in semi-analytical scattering models for NDT simulation. — Journal of Physics: Conference Series 269 (2011) 012013. DOI:10.1088/1742-6596/269/1/012013
4. Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками. — Контроль. Диагностика, 2015, № 8, с. 7—22.
5. Базулин Е.Г. Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой. — Дефектоскопия, 2017, № 1, с. 11—25.
6. Guarneri Giovanni Alfredo, Pipa Daniel Rodrigues, Junior Flávio Neves, Ramos de Arruda Lúcia Valéria and VictorWüst Zibetti Marcelo. A Sparse Reconstruction Algorithm for Ultrasonic Images in Nondestructive Testing. — Sensors, 2015, No. 15, p. 9324—9343. DOI: 10.3390/s150409324
7. Schiffner M.F., Schmitz G. Fast image acquisition in pulse-echo ultrasound imaging using compressed sensing. — Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). — Dresden, Germany, 2012, No. 10, p. 1944—1947
8. van Miert R. Solving the acoustical inverse problem using SAFT, the Born approximation and quasi-stretching. — Delft University of Technology, 28 May 2013.—56 p.
9. Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум. — Контроль. Диагностика, 2015, № 9, с. 10—27.
10. Базулин Е.Г. Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей. — Дефектоскопия, 2015, № 1, с. 58—71.
11. Bazulin E.G. Reconstructing the deflector images from the ultrasonic echo signals by the maximum entropy method. — Applied Physics Research, 2014, v. 6, No. 6, p. 87—106. DOI: 10.5539/APR.V6N6P87
12. Гончарский А.В., Романов С.Ю., Сержников С.Ю. Суперкомпьютерные технологии в задачах проектирования томографических диагностических комплексов.— СПб.: Издательство политехнического университета, 2016.—230 с.
13. Samacho J., Parrilla M., Fritsch C. Phase coherent image. — IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2009, v. 56, No. 5, p. 958—974.

14. Ultrasound imaging. Edited by Masayuki Tanabe. — Croatia: InTech, 2011, p. 210.
 15. Базулин Е.Г., Кокорев С.А. Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решеток. — Дефектоскопия, 2013, № 5, с. 45—58.
 16. Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование волн дифракции для ультразвуковой дефектометрии в алгоритмах когерентного восстановления высококачественных изображений отражателей. — В мире неразрушающего контроля, 2012, № 3(57), с. 20—25.
-