

Расчёт ошибки определения амплитуды блика изображения отражателя, восстановленного методом ЦФА, в зависимости от шага сетки изображения

1. Цель

При проведении контроля с использованием анализа изображения отражателей, восстановленного методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА), нужно выбрать оптимальные размеры шага сетки области восстановления изображения (ОВИ). Очень грубый шаг может привести к значительной ошибке определения амплитуды блика отражателя, а очень тщательный шаг может неоправданно увеличить время восстановления ЦФА-изображения. В соответствии с [1] ошибка определения амплитуды бликов отражателей из-за параметров ОВИ на должна превышать 2 дБ. В вышедших в начале 2021 года двух стандартах ISO [2, 3] описан принцип расчёта ошибки определения амплитуды блика отражателя в зависимости от шага сетки ОВИ, основанный на анализе ЦФА-изображения восстановленного на сетке с очень мелким шагом равным одной двадцатой длины волны. Недостатком такого способа является большое время получения результата. Поэтому задача выбора оптимального шага сетки изображения, позволяющего с максимальной скоростью получать изображения с минимальными ошибками определения амплитуд бликов, является актуальной.

Предлагаемый в данной заметке способ позволяет, более чем в десять раз повысить скорость расчёта оценки ошибки амплитуды блика точечного отражателя по всей области восстановления изображения (ОВИ).

Способ оценки ошибки основан на том, что блик точечного отражателя, восстановленного методом ЦФА, можно представить в виде двумерной гауссоиды [4]. Предлагаемый способ реализуется следующей последовательностью шагов.

1. Задаются шаги $(\Delta x_i, \Delta z_i)$ сетки восстанавливаемого изображения по обеим осям.
2. Задаются шаги оценочной сетки, где будут расположены точечные отражатели. Шаг этой сетки может быть более грубым, чем шаг сетки изображения.
3. Для каждого узла оценочной сетки оценивается вид функции рассеяния точки (ФРТ) в виде двумерной гауссоиды $s(x_s, z_s)$, размеры которой определяются значениям фронтальной $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ и лучевой $\Delta_{\text{луч}}$ разрешающей способности.
4. Задаются координаты четырёх точек по углам прямоугольника со сторонами равным шагам по обеим осям изображения с центром прямоугольника в нуле.
5. Производится поворот прямоугольника размерами $\Delta x_i \times \Delta z_i$ на угол поворота блика φ_s , который определяется углом прихода луча от центра антенной решётки до точечного отражателя.

6. Рассчитываются значения двумерной Гауссоиды в определённых выше четырёх точках. Максимальное значение из четырёх и будет полагаться ошибкой определения амплитуды блика точечного отражателя *Error*.

2. Расчёт ФРТ в виде гауссоиды

Лучевая разрешающая способность $\Delta_{\text{луч}} \approx \Delta_{\text{луч}}(x, z)$ изображения, восстановленного методом ЦФА, определяется в основном длиной излучённого импульса τ и слабо зависит от точки (x, z) , принадлежащей ОВИ,

$$\Delta_{\text{луч}} = \frac{c\tau}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость используемой для восстановления ультразвуковой волны.

Фронтальная разрешающая способность $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ определяется угловыми размерами апертуры АР для точки (x, z) ОВИ, и длиной волны λ используемой ультразвуковой волны [5].

Фронтальное разрешение $\Delta_{\text{фронт}}(x, z)$ можно оценить по формуле

$$\Delta_{\text{фронт}}(x, z) = \frac{\lambda}{4 \sin \frac{\alpha_A(x, z)}{2}}, \quad (2)$$

где $\alpha_A(x, z)$ угловая апертура для точки (x, z) , которая определяется как угол между лучами пришедших в точку (x, z) от первого и последнего элемента антенной решётки.

Амплитуду ФРТ в системе координат (x_s, z_s) можно представить в виде двумерной гауссоиды

$$s(x_s, z_s) = e^{-\frac{x_s^2}{\sigma_{\text{фронт}}}} e^{-\frac{z_s^2}{\sigma_{\text{луч}}}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{фронт}}$ и $\sigma_{\text{луч}}$ определяются из условия равенства 0,1 функции $s(x_s, z_s)$ на расстояниях $\Delta_{\text{фронт}}/2$ и $\Delta_{\text{луч}}/2$ (Рис. 1).

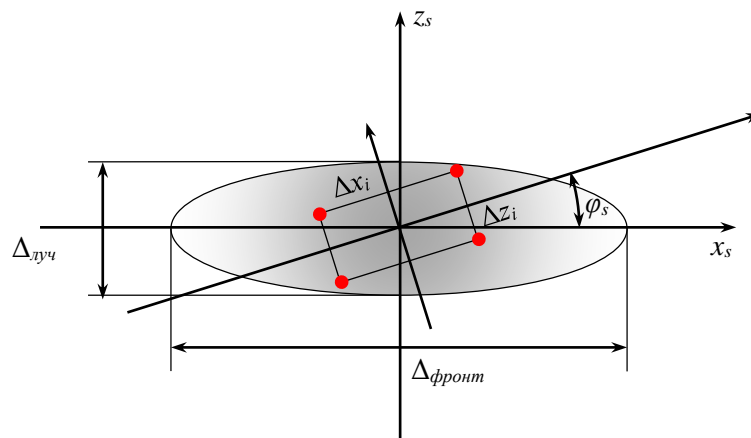


Рис. 1. К расчёту ФРТ

На Рис. 2 в растровом виде показан график фронтальной разрешающей способности для продольной волны [6]. На этом же рисунке в виде эллипсов чёрного цвета показаны размеры ФРТ, рассчитанные согласно (3), в зависимости от положения точки в ОВИ.

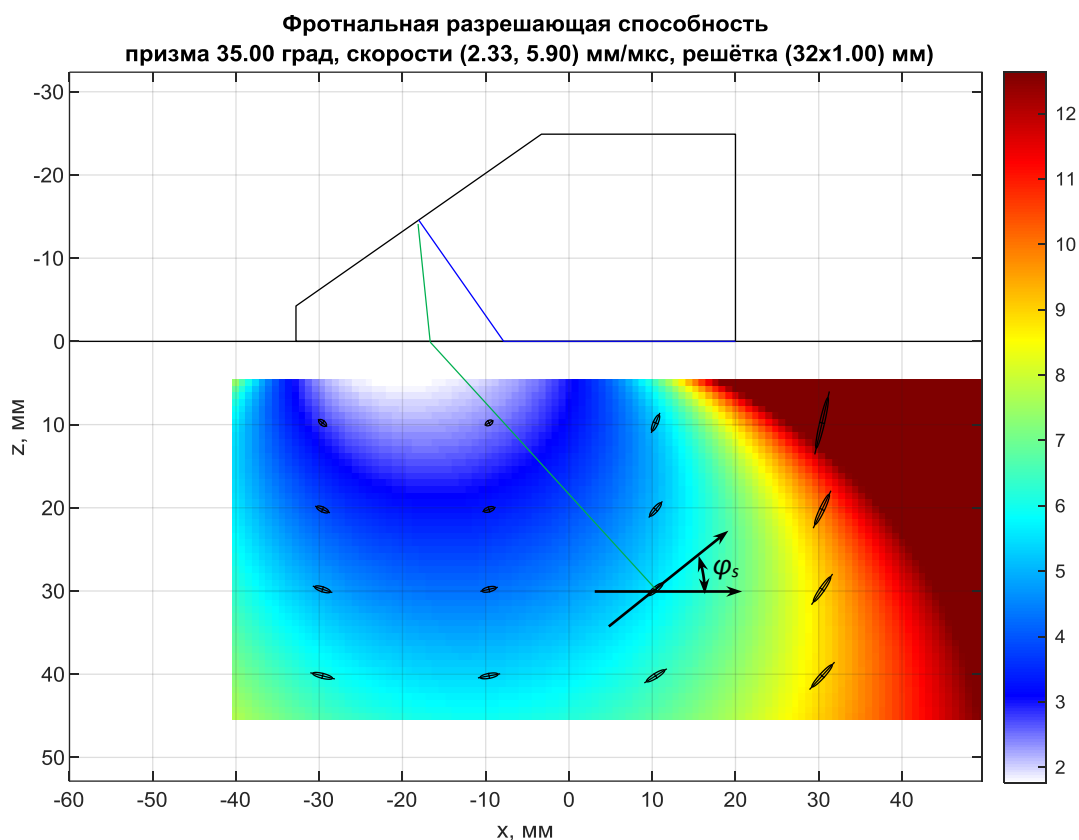


Рис. 2. График фронтальной разрешающей способности. Эллипсами схематически показаны примерные размеры блика ФРТ

После определения вида функции $s(x_s, z_s)$, рассчитывается угол поворота блика φ_s (Рис. 2), в четырёх точках повернутого на этот угол прямоугольника размерами $\Delta x_i \times \Delta z_i$, которые отмечены на Рис. 1 четырьмя кругами красного цвета, рассчитываются значения двумерной гауссоиды. Максимальное значение из четырёх и будет полагаться ошибкой определения амплитуды блика точечного отражателя для заданного положения точечного отражателя.

3. Проверка соответствия оценки ФРТ в виде гауссоиды форме реальных бликов

Для проверки работоспособности предложенного способа методом ЦФА были восстановлены изображения отверстий бокового сверления (БЦО) диаметром 4 мм в стальном образце. Для регистрации эхосигналов использовалась 32-ух элементная антенная решётка с рабочей частотой 5 МГц с шагом 1,0 мм на рексолитовой призме с углом наклона 35 градусов. На Рис. 3 показано изображение отражателей для данного положения. На этом же рисунке линиями чёрного цвета нанесены контуры образца и БЦО. Передняя грань призмы находилась на расстоянии -3,0 мм от центров БЦО.

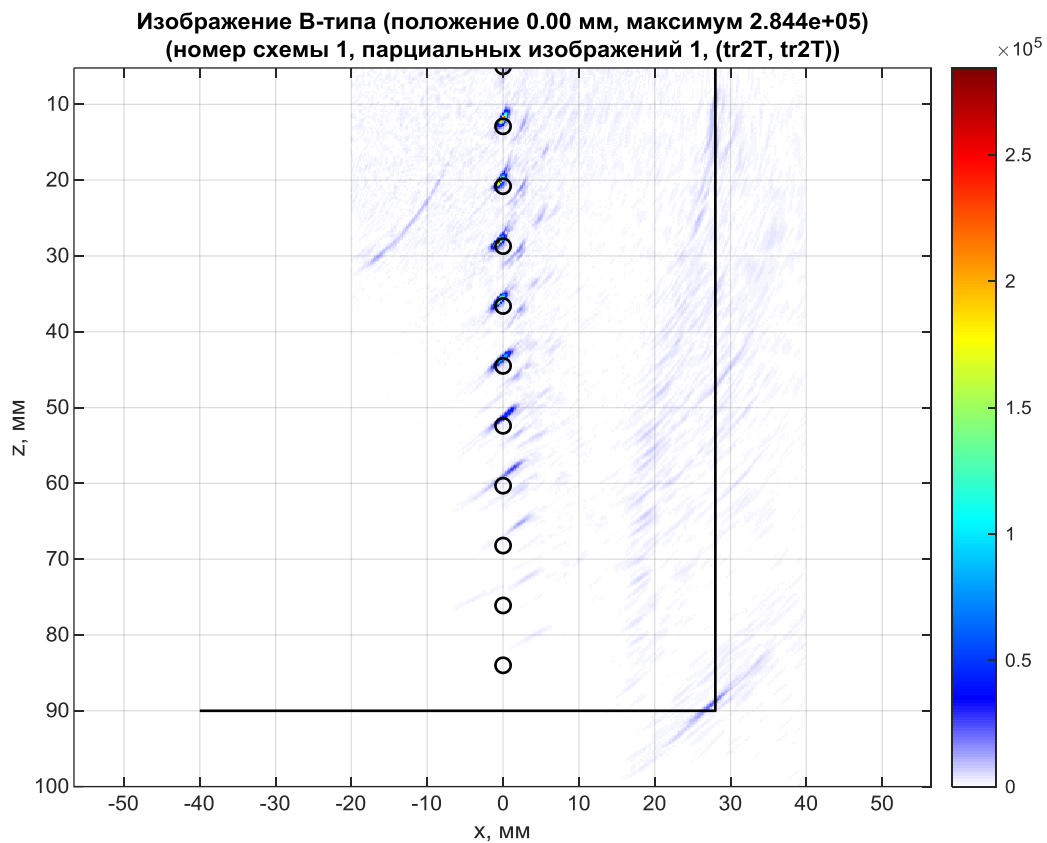
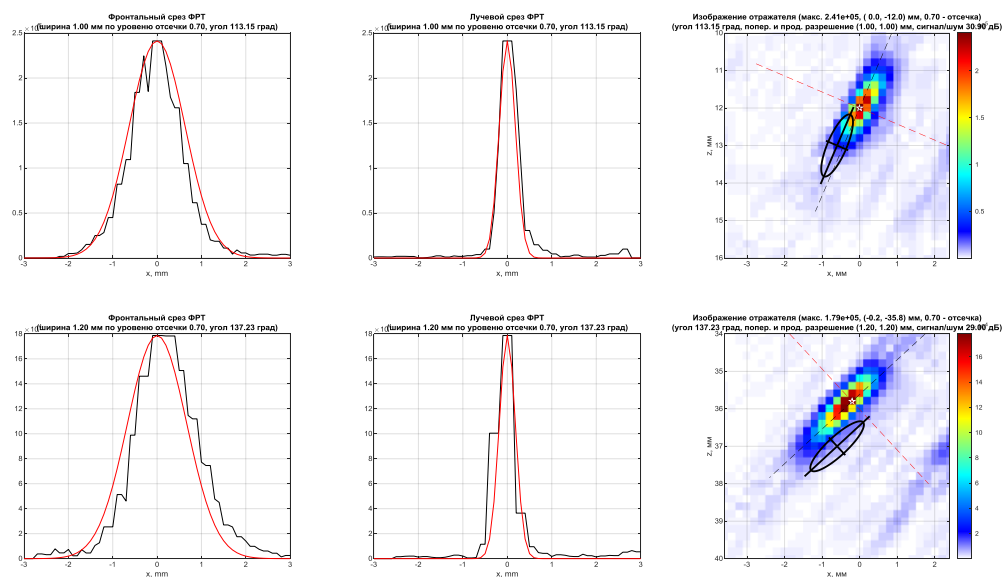


Рис. 3. Изображение БЦО диаметром 4 мм при координатах передней грани призмы -3 мм

На Рис. 4 линиями чёрного цвета показаны фронтальные (левый ряд) и лучевые срезы (центральный ряд) реального блика БЦО вдоль осей (x_s, z_s). Изображения бликов в растровом виде показаны в правом столбце. На этих же изображениях эллипсом чёрного цвета показана оценка ФРТ развёрнутая на угол φ_s . Линиями красного цвета показаны расчётные срезы ФРТ согласно формуле (3). Видно, что реальная и расчётная ФРТ достаточно хорошо совпадают для БЦО на разных глубинах и для разных положений антенной решётки от БЦО, что позволяет считать предложенную оценку ФРТ пригодной для практического использования.



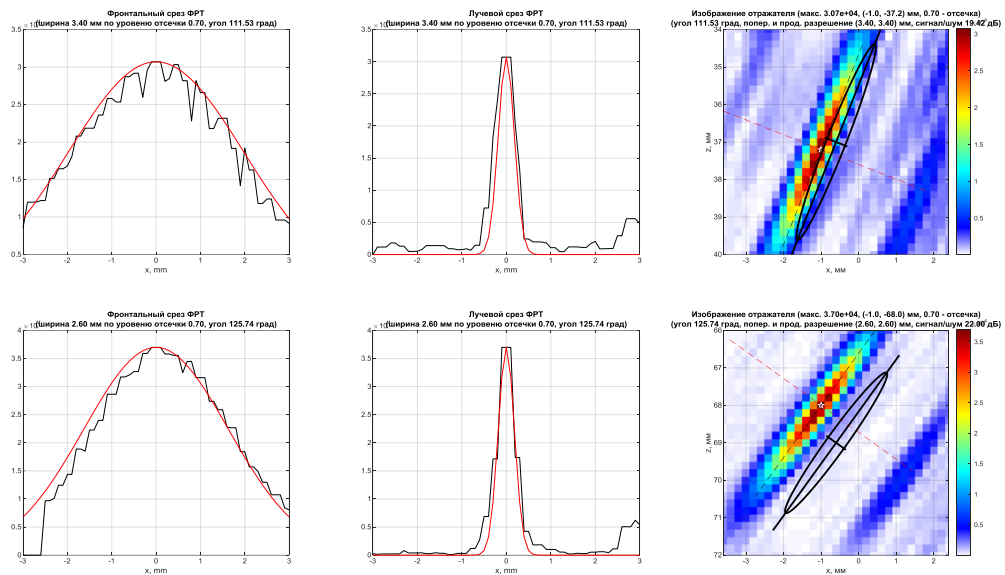


Рис. 4. Фронтальные и лучевые срезы ФРТ и реального блика БЦО на разных глубинах

4. Проверка работоспособности предложенного способа

Работоспособность предложенного метода проверялась следующим образом. Для каждого точечного отражателя, расположенного в узле оценочной сетки, рассчитывались эхосигналы с учётом диаграммы направленности элемента антенной решётки, коэффициентов преломления на границе «призма-объект контроля» и коэффициента расхождения. После этого на прецизионной сетке с шагом $(\Delta x_{i,p}, \Delta z_{i,p})$ порядка одной двадцатой длины волны рассчитывалось ЦФА-изображение точечного отражателя. Полагая, что центр элементарной ячейки сетки $(\Delta x_i, \Delta z_i)$ совпадает с точкой расположения точечного отражателя (Рис. 5, звезда чёрного цвета), рассчитывались значения в узлах сетки (Рис. 5, четыре звезды белого цвета), максимальное из которых полагалось ошибкой $Error_{ISO}$ определения амплитуды блика. На Рис. 5 показаны ЦФА-изображения трёх точечных отражателей в разных точках ОВИ. На изображениях эллипсами чёрного цвета показаны рассчитанные по формуле (3) контуры ФРТ.

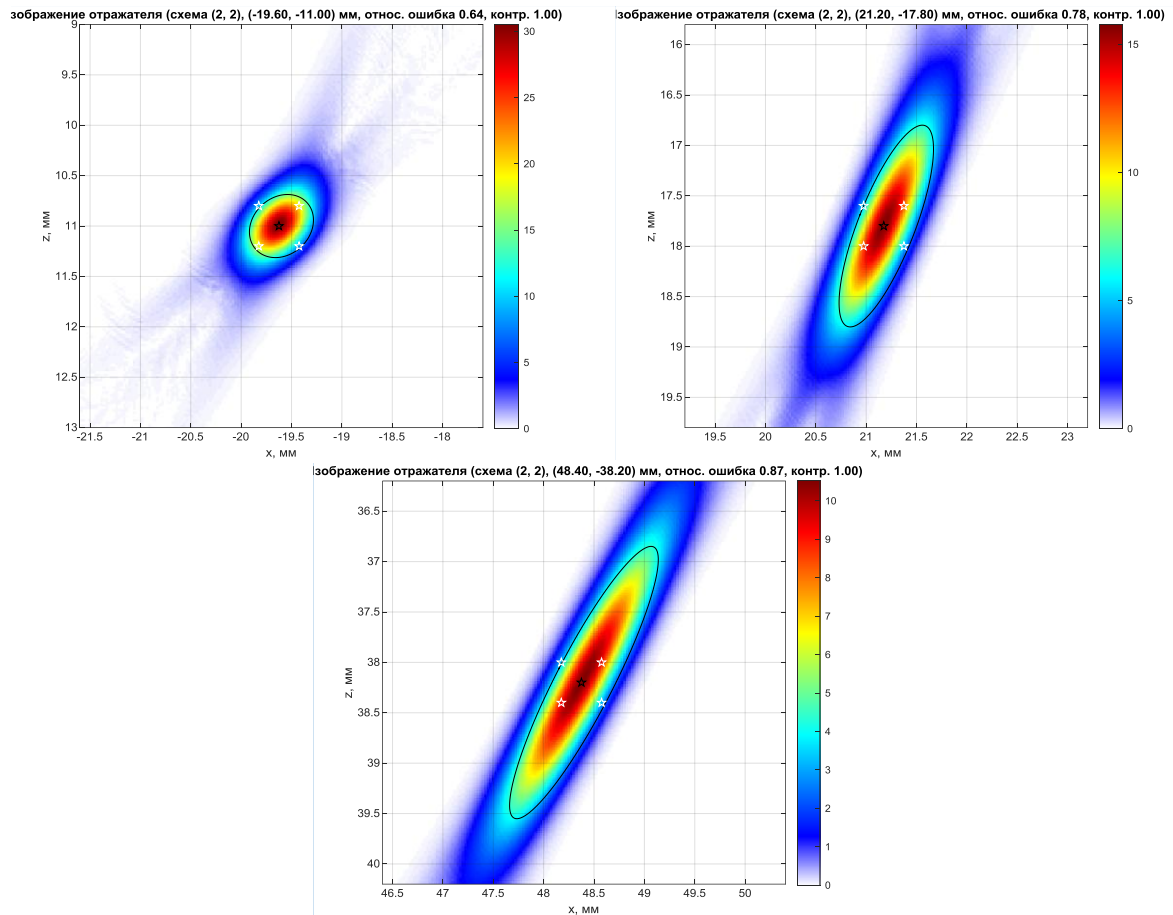


Рис. 5. Восстановленный вид ФРТ и её оценка (эллипс чёрного цвета)

4.1. Призма 20 градусов

Расчёты $Error$ и $Error_{ISO}$ проводились для 32-ух элементной антенной решётки с рабочей частотой 5 МГц с шагом 1,0 мм на плексигласовой призме с углом наклона 20 градусов.

4.1.1. Шаг сетки 0.4 мм

На Рис. 6 приведены расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом 0,4 мм. Максимальная разница между $Error$ и $Error_{ISO}$ равна 0,43 дБ.

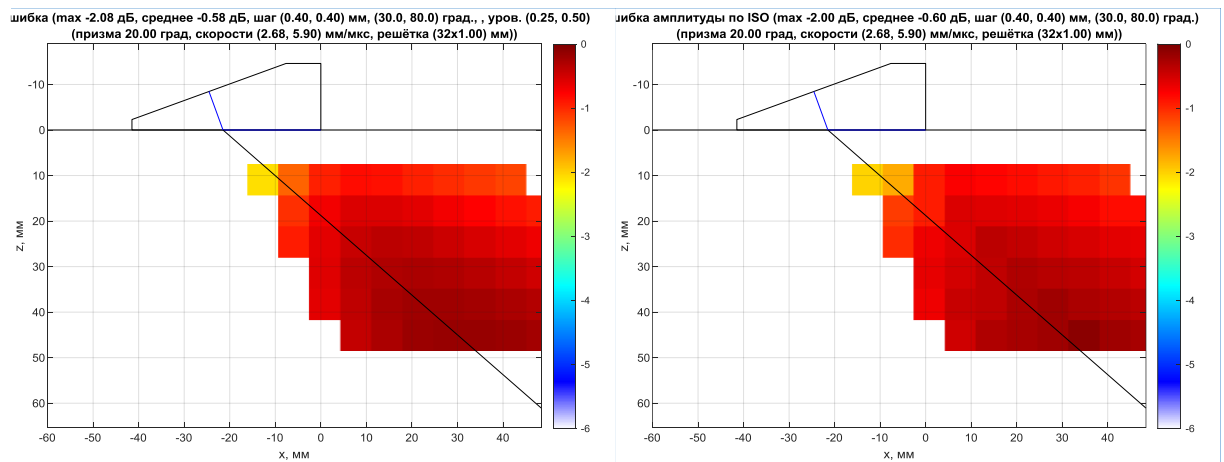


Рис. 6. Расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом ($\Delta x_{i,p} = \Delta z_{i,p} = 0,4$ мм)

4.1.2. Шаг сетки 0.2 мм

На Рис. 7 приведены расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом 0,2 мм. Максимальная разница между $Error$ и $Error_{ISO}$ равна 0,15 дБ. Уменьшение шага сетки привело к значительному уменьшению ошибки между двумя способами её расчёта.

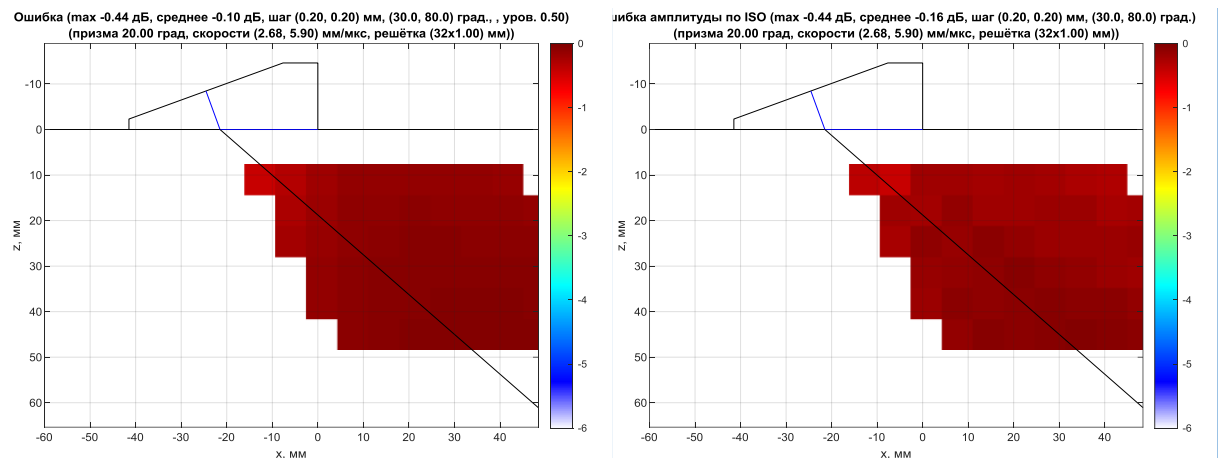


Рис. 7. Расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом ($\Delta x_{i,p} = \Delta z_{i,p} = 0,2$ мм)

4.2. Призма 35 градусов

Расчёты $Error$ и $Error_{ISO}$ проводились для 32-ух элементной антенной решётки с рабочей частотой 5 МГц с шагом 1,0 мм на рексолитовой призме с углом наклона 35 градусов.

4.2.1. Шаг сетки 0.4 мм

На Рис. 8 приведены расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом 0,4 мм. Максимальная разница между $Error$ и $Error_{ISO}$ равна 0,63 дБ. Надо отметить, что такой грубый шаг не рекомендуется упомянутыми выше ISO.

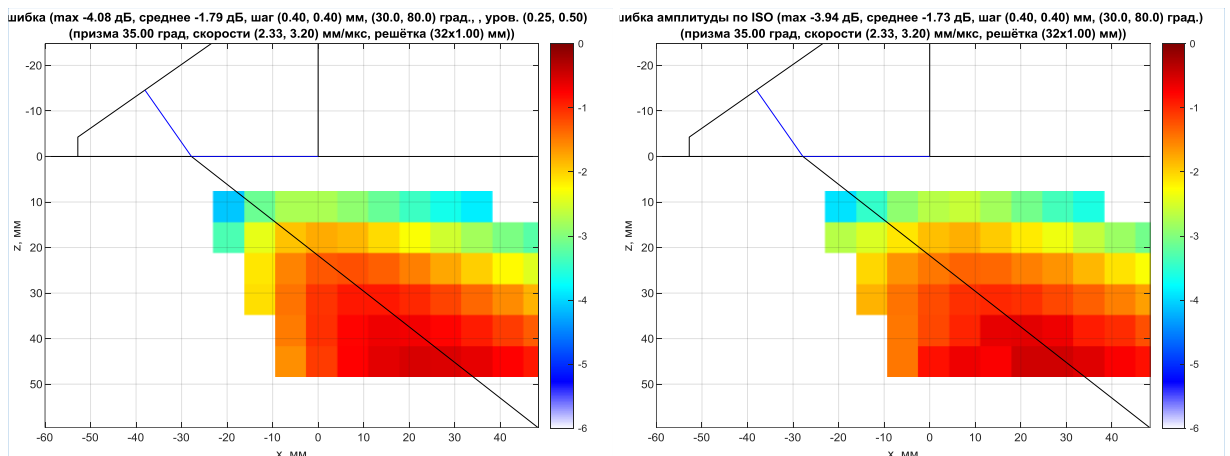


Рис. 8. Расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом ($\Delta x_{i,p} = \Delta z_{i,p} = 0,4$ мм)

4.2.2. Шаг сетки 0.3 мм

На Рис. 9 приведены расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом 0,3 мм. Максимальная разница между $Error$ и $Error_{ISO}$ равна 0,39 дБ.

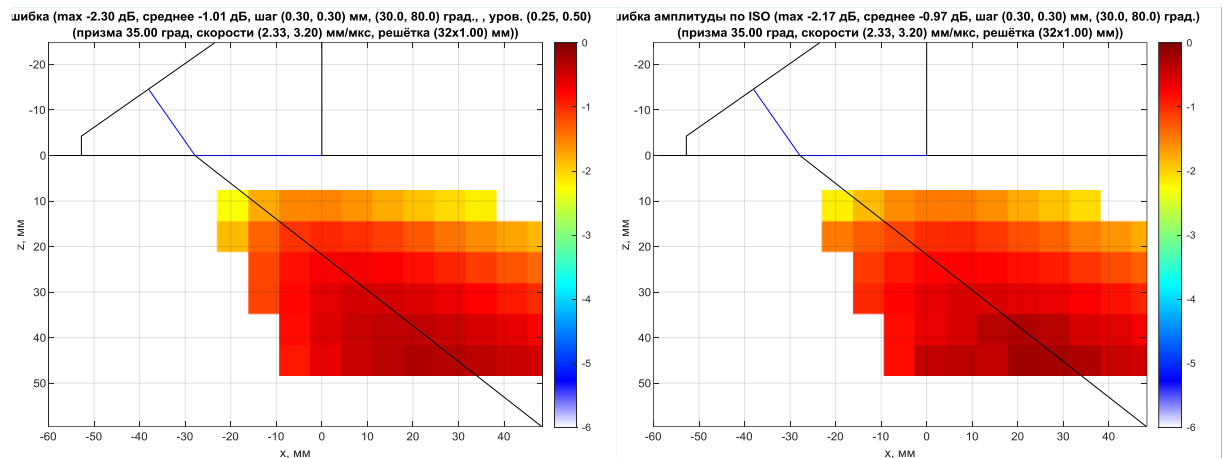


Рис. 9. Расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом ($\Delta x_{i,p} = \Delta z_{i,p} = 0,3$ мм)

4.2.1. Шаг сетки 0.2 мм

На Рис. 10 приведены расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом 0,2 мм. Максимальная разница между $Error$ и $Error_{ISO}$ равна 0,22 дБ.

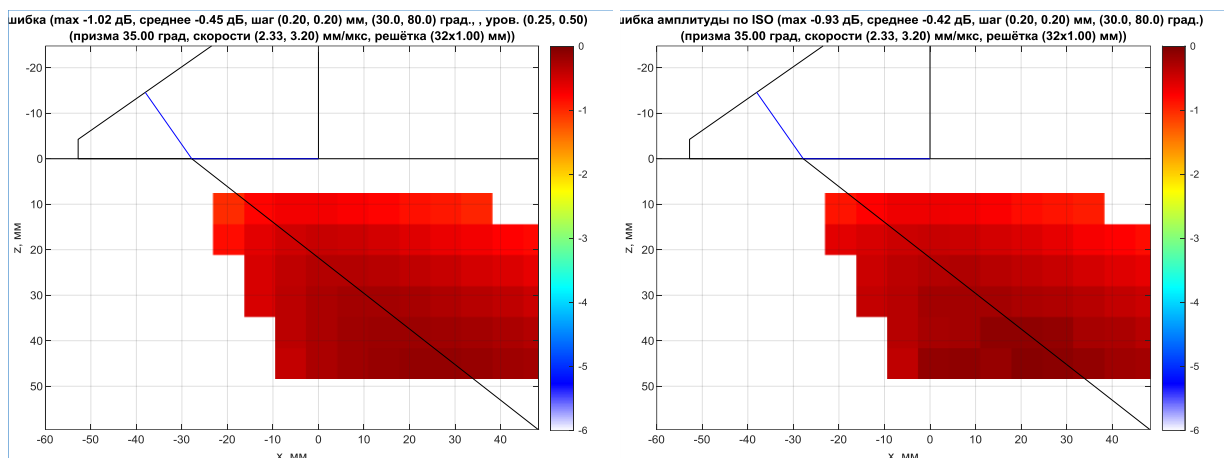


Рис. 10. Расчёты $Error$ (слева) и $Error_{ISO}$ (справа) для сетки с шагом ($\Delta x_{i,p} = \Delta z_{i,p} = 0,2$ мм)

5. Выводы

1. Предлагаемый способ позволяет более чем в десять раз повысить скорость расчёта оценки ошибки амплитуды блика точечного отражателя по всей ОВИ.
2. Оценка ошибки предложенного метода от метода, описанного в стандарте ISO, около 0,5 дБ. И чем меньше шаг сетки, тем меньше разница между $Error$ и $Error_{ISO}$.

Базулин Е.Г.

09-10, 13 сентября, 01 октября 2021 года

6. Список литературы

1. ASME BPVC.V-2017 Section V. ASME boiler and pressure vessel code. An international code. Nondestructive examination, URL: https://www.techstreet.com/standards/asme-bpvc-v-2017?product_id=1933511 (дата обращения: 04.12.2020)
2. BS-ISO-23864-2021 - применение ЦФА, URL: <https://www.iso.org/standard/77203.html> (дата обращения: 01.10.2021)
3. BS-ISO-23865-2021 - ЦФА в автоматизированном контроле, URL: <https://www.iso.org/standard/78034.html> (дата обращения: 01.10.2021)
4. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Сухоруков Н.И., Тихонов Д.С. Анализ фазы ЦФА-изображения с целью определения типа обнаруженного отражателя // Дефектоскопия. 2019. №7. С. 20-29.
5. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007.: URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 26.11.2020).
6. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Оценка дефектов при ультразвуковом контроле методом цифровой фокусировки апертуры. Условия, возможности, границы применимости // Контроль. Диагностика. 2017. №9. С. 6-18. DOI: 10.14489/td.2017.09.pp.006-018.