

УДК 534.8+620

PACS: 43.60.+d

## **Применение линейной интерполяции для повышения качества изображений дефектов, получаемых методом проекции в спектральном пространстве, при ультразвуковом неразрушающем контроле**

Коколев С.А., Базулин Е.Г., Базулин А.Е.

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: [bazulin@echoplus.ru](mailto:bazulin@echoplus.ru)

В статье рассмотрена возможность применения линейной интерполяции двумерного пространственного спектра при восстановлении изображений дефектов методом проекции в спектральном пространстве (ПСП) по данным ультразвукового неразрушающего контроля. Проанализированы различные алгоритмы интерполяции. Представлены результаты численных и модельных экспериментов, в которых получены изображения с применением интерполяции и при отсутствии интерполяции. Показана эффективность применения предложенного алгоритма для повышения качества изображений, полученных методом ПСП.

### **Введение**

Для получения высококачественного изображения внутреннего сечения объекта контроля по эхосигналам, полученным при перемещении пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) по доступной для ввода ультразвука поверхности могут быть использованы алгоритмы, выполняющие совместную когерентную обработку массива эхосигналов. Среди таких алгоритмов на практике обычно применяется метод Synthetic Aperture Focusing technique (SAFT) [1, 2, 3], метод угловых спектров (МУС) или метод обращённой волны [4] и имеющий сходную идеологию с МУС метод проекции в спектральном пространстве (ПСП) [5]. Отличие метода ПСП заключается в возможности существенного ускорения процедуры восстановления изображения за счет отказа от дискретного преобразования Фурье (ДПФ) спектров голограмм и введения этапа проекции спектра с последующим бы-

стрым преобразованием Фурье (БПФ). Такой алгоритм является основным при получении изображений в системах автоматизированного ультразвукового контроля серии АВГУР.

Ошибки интерполяции нулевого порядка на этапе проекции спектра, приводят к тому, что в изображении при определённых условиях могут сформироваться ложные блики с амплитудой до 30% от амплитуды бликов, соответствующих реальным дефектам. Особенно сильно проявляются ошибки интерполяции при ненулевых углах наклона ракурса сканирования, разных шагах сетки с эхосигналами и изображениями, при наличии эхоимпульса от дна при использовании прямых преобразователей. Артефакты изображения дефектов приводят к увеличению времени на анализ изображения экспертом, а также могут привести к перебраковке. Борьба с ложными бликами можно: применяя метод угловых спектров, ДПФ, либо используя более сложный алгоритм интерполяции, например, линейный, билинейный или sinc-интерполяцию.

Вопросам интерполяции, как важного этапа реконструкции томографических изображений посвящена серия статей, опубликованная в журнале «Дефектоскопия» [6, 7, 8]. Важным показателем качества реконструкции, исследованным в статье, являются ошибки интерполяции первого и второго рода, из которых первые могут быть устранены более совершенными методами интерполяции, а вторые обусловлены наложением фрагментов спектров из-за периодичности БПФ.

В настоящей статье опробованы методы интерполяции для устранения ошибок интерполяции первого рода. Ошибки второго рода исключаются корректным выбором параметров сбора и обработки данных.

## **Получение изображения дефектов с использованием дискретного двумерного преобразования Фурье**

Рассмотрим многоракурсную совмещенную схему измерений при гармоническом возбуждении излучающего поля на частоте  $f$ . Будем рассматривать случай однородного двумерного бесконечного пространства. Введём абсолютную систему координат  $xz$ , которая привязана к центру объекта контроля, условно представленному на Рис. 1. Для излучения и приема ультразвуковых импульсов используется преобразователь, который перемещается по одной или нескольким линиям в пространстве. Прием эхосигналов отраженных от дефектов, расположенных в области  $S$ , происходит тем же преобразователем. При этом линия перемещения может быть расположена под произвольным углом  $\alpha$  к оси  $x$ , что соответствует измерению поля с одного ракурса.

Рис. 1

Поле в области регистрации голограммы в Борновском приближении, то есть без учета перерассеивания, можно представить в виде [9, 10]:

$$p(\vec{r}, f) = \int_S G(\vec{r}, f) \varepsilon(\vec{r}) p_i(\vec{r}, f) d\vec{r} + p_i(\vec{r}, f), \quad (1)$$

где  $G(\vec{r}, f)$  – функция Грина для однородного бесконечного пространства,  $p_i(\vec{r}, f)$  – падающее поле в области приёма. Функция Грина, соответствующая приему для однородного двумерного бесконечного пространства для частоты  $f$  имеет вид [9, 10]:

$$G(\vec{r}, f) = \frac{i}{4} H_0^{(2)}(k|\vec{r}|) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{i}{2\pi k}} \frac{e^{ik|\vec{r}|}}{\sqrt{|\vec{r}|}}, \quad (2)$$

где  $k = 2\pi f / c$  – волновое число при излучении на частоте  $f$  в среде со скоростью звука  $c$ ,  $H_0^{(2)}$  – функция Ганкеля второго рода нулевого порядка. В общем случае, скорость звука при приеме  $c^r$  может отличаться от скорости звука при излучении  $c^i$  [11]. Например, излучить поле можно на продольной волне, а принять на поперечной. Задача восстановления изображения дефектов заключается в нахождении значений функции перерассеивания  $\varepsilon(\vec{r}, f)$  по измеренному полю  $p(\vec{r}, f)$  и известному падающему полю  $p_i(\vec{r}, f)$ . Там, где функция  $|\varepsilon(\vec{r}, f)|$  имеет максимальные значения, расположены отражающие ультразвук области несплошностей. Для совмещенного режима можно записать  $p_i(\vec{r}, f) \equiv G(\vec{r}, f)$ . Кроме того, при регистрации эхосигналов в режиме отражения можно считать падающее поле  $p_i(\vec{r}, f)$  в области регистрации пренебрежимо малым. Эти допущения позволяют записать уравнение (1) в виде свертки

$$p(\vec{r}, f) = \int_S G(\vec{r}, f) \varepsilon(\vec{r}, f) p_i(\vec{r}, f) d\vec{r} = \int_S G^2(\vec{r}, f) \varepsilon(\vec{r}, f) d\vec{r}. \quad (3)$$

Решение этого уравнения основывается на обобщенной теореме о проекциях [12]. Обозначим через  $N_a$  количество ракурсов, по которым проведено измерение рассеянного поля. Метод получения изображения основан на возможности разложить функцию  $G^2(\vec{r}, f)$  на набор плоских волн, волновые вектора которых лежат на окружности радиусом  $k^{tr} = k^i + k^r$ . Если излучение и прием происходят на волнах одного типа со скоростью  $c = c^i = c^r$ , то  $k^{tr} = 2k$ , где  $k = 2\pi f / c$ . Иначе говоря, двумерный спектр функции  $G^2(\vec{r}, f)$  отличен от нуля только на окружности радиуса  $k^{tr}$  [4], при условии учета только однородных волн. Данное свойство функции Грина лежит в основе целого класса методов получения изображения дефектов (обобщенная теорема о проекциях).

Далее через преобразование Фурье голограмм  $p(\vec{r}, f)$  по пространственной координате, находятся их спектры, то есть набор плоских волн с заданными волновыми координатами и амплитудами.

$$H(k_x^{tr}, f, \alpha) = \mathfrak{F}_x(p(\vec{r}, f, \alpha)), \quad (4)$$

где  $H(k_x^{tr}, f, \alpha)$  – пространственный спектр рассеянного поля для одного ракурса  $\alpha$ , символом  $\mathfrak{F}_x$  обозначен оператор преобразования Фурье вдоль оси  $x_r$ .

Так как  $H(k_x^{tr}, f, \alpha)$  определяет амплитуду и направление распространения плоской волны, то для получения изображения необходимо применить к рассчитанным спектрам  $H(k_x^{tr}, f, \alpha)$  дискретное обратное двумерное преобразование Фурье.

$$\varepsilon(\vec{r}, f) = \mathfrak{F}_{xz}^{-1} \left( \sum_{j=1}^{N_\alpha} H(k_x^{tr}, f, \alpha_j) \right), \quad (5)$$

где символом  $\mathfrak{F}_{xz}^{-1}$  обозначен оператор дискретного обратного двумерного преобразования Фурье.

В случае импульсного излучения ультразвука при реализации традиционного эхо-метода дефектоскопии, выполнив преобразование Фурье по времени принятых эхосигналов, можно рассчитать набор голограмм в диапазоне частот, определенном резонансными свойствами ПЭП. Однако, применение ДПФ, согласно формуле (5), связано с очень большими временными затратами. Особенно это заметно при обработке многочастотных голограмм. Например, получение изображения на сетке 512 x 512 по 103 голограммам заняло 3600 секунд при работе на персональном компьютере Pentium IV 2.6 ГГц. Ускорить процесс получения изображения на несколько порядков можно, применяя метод проекции в спектральном пространстве, но при этом возникают ошибки интерполяции, которые отрицательно сказываются на качестве изображения.

## **Ускорение обработки с помощью метода проекции в спектральном пространстве**

С физической точки зрения метод проекции в спектральном пространстве тождественен методу угловых спектров или методу обращения волнового фронта [4], а с вычислительной точки зрения многоракурсный метод ПСП представляет собой техническое ухищрение, позволяющее существенно ускорить процесс восстановления изображения дефектов. Суть метода ПСП заключается в том, что вдоль линии  $x_r$  под наклоном  $\alpha$  измеряется рассеянное поле  $p(\vec{r}, f, \alpha)$  и вычисляется его спектр  $\mathfrak{F}_x(p(\vec{r}, f, \alpha))$ . Функция

$\mathfrak{I}_x(p(\vec{r}, f, \alpha))$  из одномерной трансформируется в двумерную, при переносе оператором проекции  $P_\alpha$  значения спектра из точки  $(k_x^{tr}, 0)$  в точку  $(k_x^{tr}, k_z^{tr}) = (k_x^{tr}, \sqrt{(k_x^{tr})^2 + (k_x^{tr})^2})$ . Для того, чтобы спектры в области пространственных частот для всех ракурсов привести к одной системе координат, точку  $(k_x^{tr}, k_z^{tr})$  необходимо перевести в точку  $(k_x, k_z)$  с помощью аффинного преобразования

$$\begin{cases} k_x = -k_x^{tr} \sin \alpha + k_z^{tr} \cos \alpha \\ k_z = k_x^{tr} \cos \alpha + k_z^{tr} \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, одночастотный многоракурсный метод ПСП для восстановления изображения дефектов на частоте  $f$  при регистрации рассеянного поля по нескольким ракурсам можно записать

$$\varepsilon(\vec{r}, f) = \mathfrak{I}_{xz}^{-1} \left( \sum_{j=1}^{N_\alpha} P_{\alpha_j} (H(k_x^{tr}, f, \alpha_j)) \right), \quad (7)$$

где  $H(k_x^{tr}, f, \alpha_j)$  - спектр рассеянного поля для ракурса  $\alpha_j$ , символом  $\mathfrak{I}_{xz}^{-1}$  обозначен оператор обратного двумерного БПФ. Ошибки интерполяции возникают на этапе применения оператора проекции  $P_{\alpha_j}$ . Таким образом, по измеренному полю  $p(\vec{r}, f, \alpha_j)$  можно рассчитать часть двумерного спектра  $E(\vec{k})$  неизвестной функции  $\varepsilon(\vec{r}, f)$  на окружности (сфера Эвальда) радиусом  $k^{tr} = k^i + k^r$ , которая на Рис. 2 показана сплошной тонкой линией. Рис. 2

Как следует из [4], функция рассеяния точки имеет ширину «основного лепестка» около  $\lambda / 4 = \frac{\pi}{2k^r}$ , а уровень «боковых лепестков» составляет около 40 процентов от амплитуды «основного лепестка». Очевидно, что восстановленное изображение тем ближе соответствует форме границы несплошности, чем большую часть спектра  $E(\vec{k})$  удастся определить. Для этих целей эффективно использование многочастотного режима, когда суммируются изображения, восстановленные на  $N_f$  частотах в некотором диапазоне  $\Delta f = (f_{\min}, f_{\max})$

$$\varepsilon(\vec{r}, \Delta f) = \sum_{n=1}^{N_f} \varepsilon(\vec{r}, f_n) \quad (8)$$

В этом случае можно получить информацию о части двумерного спектра неизвестной функции рассеивания  $\varepsilon(\vec{r})$  на кольце, которое отмечено на Рис. 3 кривой штриховкой. Ширина основного лепестка функции рассеяния точки при этом не изменится, но уровень боковых лепестков будет тем меньше, чем шире спектр излученного сигнала Рис. 3

$\Delta f = f_{\min} - f_{\max}$ , и на практике может составлять около 10-20 процентов от амплитуды основного лепестка.

Для случая одного ракурса, наиболее часто реализуемого при неразрушающем ультразвуковом контроле сварных швов и подобных объектов, область известного спектра сокращается до сектора, выделенного штриховкой на Рис. 4 и определяемого углом ракурса и границами диаграммы направленности ПЭП.

Рис. 4

## Методы интерполяции

Как было упомянуто выше, одним из этапов алгоритма ПСП является проекция спектров голограмм на сферы Эвальда. Поскольку следующим этапом получения изображения является двумерное быстрое преобразование Фурье, сетка, на которую выполняется проекция, должна быть декартовой с равноотстоящими отсчетами. Для переноса данных на такую сетку может быть использована простейшая интерполяция нулевого порядка (с округлением координат до ближайшей точки сетки). Этот алгоритм интерполяции, хотя и требует минимальных временных затрат, но приводит к появлению ошибок. Ошибки вносят наибольшие искажения при использовании прямых ПЭП или при угле ракурса сканирования, отличном от нуля. Для уменьшения уровня ошибок возможно применять линейную интерполяцию, интерполяцию по четырехточечному шаблону, кусочно-линейную интерполяцию по треугольнику, и sinc-интерполяцию. Sinc-интерполяция в рамках данной работы не рассматривалась, поскольку, как идеально точная, она по достигаемому качеству изображения должна совпадать с результатом восстановления с помощью ДПФ (5) и данный вид интерполяции потребует временных затрат сопоставимых с расчетом через ДПФ.

### Кусочно-линейная интерполяция по треугольнику

На Рис. 5 показаны черными пунктирными линиями сетка исходных данных – спектров голограмм, черными сплошными – сетка спектра изображения. Угол поворота сеток друг относительно друга  $30^\circ$ . При таком взаимном расположении сеток при использовании интерполяции нулевого порядка в итоговом изображении наблюдается высокий уровень шума и ложные блики с амплитудой до 30% от правильных бликов. Это объясняется несовершенством интерполяции нулевого порядка, которая дает слишком большую ошибку при повороте сеток друг относительно друга и при их сдвиге.

Рис. 5

Операция проекции с использованием кусочно-линейной интерполяции по треугольнику проводится следующим образом: обходятся все точки исходной сетки, в которой получены спектры голограмм; на каждом шаге алгоритма берутся **четыре** точки, по-

парно лежащие на соседних окружностях (точки 0, 1, 2, 3 на Рис. 5), то есть  $H(k_x^{tr}, f, \alpha_j)$  и  $H(k_x^{tr}, f + \delta f, \alpha_j)$ , где  $\delta f$  – шаг между частотами, соответствующими соседним сферам Эвальда. Координаты этих точек  $k_x, k_z$  пересчитываются в координаты прямоугольной сетки  $k'_x, k'_z$  ( $k'_x = k_x \cdot \cos \alpha + k_z \cdot \sin \alpha$ ,  $k'_z = -k_x \cdot \sin \alpha + k_z \cdot \cos \alpha$ ). В полученном четырехугольнике рассчитываются длины диагоналей и, в соответствии с правилами триангуляции, выбирается кратчайшая диагональ (Рис. 5). В рассматриваемом случае это диагональ от точки 0 до точки 2. Исходный четырехугольник разбивается этой диагональю на два треугольника, в которых будет выполняться интерполяция. В прямоугольной области, показанной на Рис. 5 серым цветом, ограничивающей четырехугольник, ищутся все точки сетки изображения (сплошные черные линии на Рис. 5), попадающие в один из двух треугольников по следующему алгоритму.

Рассчитываются векторные произведения векторов, соответствующих каждой из сторон треугольника, на вектор, соединяющий вершину треугольника с рассматриваемой точкой (указанные три комбинации показаны на Рис. 6). Если знаки всех векторных произведений одинаковы, то точка лежит внутри треугольника. Если точка не попала внутрь первого треугольника, то проверяется ее принадлежность ко второму треугольнику. Если рассматриваемая точка не принадлежит ни одному треугольнику, выполняется переход к следующей точке изображения.

Рис. 6

Для определения значения функции в произвольной точке  $(k_x, k_z)$ , лежащей внутри треугольника, воспользуемся так называемыми барицентрическими координатами  $(\alpha, \beta, \gamma)$  этой точки [13]. Геометрический смысл этих координат заключается в том, что они равны отношению площадей треугольников, изображенных на Рис. 7

Рис. 7

$$\alpha = \frac{S_1}{S}, \quad \beta = \frac{S_2}{S}, \quad \gamma = \frac{S_3}{S}, \quad S = S_1 + S_2 + S_3.$$

Эти числа не отрицательные и удовлетворяют следующим соотношениям

$$\left. \begin{aligned} \alpha + \beta + \gamma &= 1 \\ \alpha k_{x1} + \beta k_{x2} + \gamma k_{x3} &= k_x \\ \alpha k_{z1} + \beta k_{z2} + \gamma k_{z3} &= k_z \end{aligned} \right\}$$

Эти соотношения будем рассматривать как уравнения для нахождения коэффициентов  $\alpha, \beta, \gamma$ . Определитель системы уравнений рассчитывается по формуле

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k_{x1} & k_{x2} & k_{x3} \\ k_{z1} & k_{z2} & k_{z3} \end{vmatrix} = (k_{x2} - k_{x1})(k_{z3} - k_{z1}) - (k_{x3} - k_{x1})(k_{z2} - k_{z1}),$$

и по модулю равен удвоенной площади треугольника. Поэтому  $\Delta \neq 0$  и, следовательно, система имеет единственное решение при любой правой части. Воспользуемся формулами Крамера [14] и выпишем вид этого решения

$$\alpha = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \beta = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad \gamma = 1 - \alpha - \beta,$$

где

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k_x & k_{x2} & k_{x3} \\ k_z & k_{z2} & k_{z3} \end{vmatrix} = (k_{x2}k_{z3} - k_{x3}k_{z2}) + k_x(k_{z2} - k_{z3}) + k_z(k_{x3} - k_{x2}),$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k_{x1} & k_x & k_{x3} \\ k_{z1} & k_z & k_{z3} \end{vmatrix} = (k_{x3}k_{z1} - k_{x1}k_{z3}) + k_x(k_{z3} - k_{z1}) + k_z(k_{x1} - k_{x3}).$$

После того как получены барицентрические координаты точки  $(k_x, k_z)$ , значение функции в ней рассчитывается по формулам (9):

$$\begin{aligned} \hat{H}^{Re}(k_x, k_z) &= \alpha H^{Re}(k_{x1}, k_{z1}) + \beta H^{Re}(k_{x2}, k_{z2}) + \gamma H^{Re}(k_{x3}, k_{z3}) \\ \hat{H}^{Im}(k_x, k_z) &= \alpha H^{Im}(k_{x1}, k_{z1}) + \beta H^{Im}(k_{x2}, k_{z2}) + \gamma H^{Im}(k_{x3}, k_{z3}) \\ \hat{H}(k_x, k_z) &= \hat{H}^{Re}(k_x, k_z) + i\hat{H}^{Im}(k_x, k_z) \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\hat{H}(k_x, k_z)$  – значение спектра изображения, полученное с помощью интерполяции.

При отладке алгоритма было обнаружено, что при интерполяции отдельно действительной и мнимой частей, амплитуда комплексного числа менее устойчива к грубому шагу интерполяции, нежели фаза. Особенно этот эффект заметен на краю области спектра, так как размер треугольников, внутри которых происходит интерполяция (Рис. 5), по мере приближения к краю области увеличивается. Для того чтобы избавиться от резких изменений амплитуды спектра, необходимо отдельно выполнить интерполяцию значения амплитуды и произвести следующие вычисления:

$$\begin{aligned} A &= \alpha |H(k_{x1}, k_{z1})| + \beta |H(k_{x2}, k_{z2})| + \gamma |H(k_{x3}, k_{z3})| \\ \hat{H}^{Re}(k_x, k_z) &= A \cos\left(\arg\left(\hat{H}(k_x, k_z)\right)\right) \\ \hat{H}^{Im}(k_x, k_z) &= A \sin\left(\arg\left(\hat{H}(k_x, k_z)\right)\right) \\ \hat{H}'(k_x, k_z) &= \hat{H}^{Re}(k_x, k_z) + i\hat{H}^{Im}(k_x, k_z) \end{aligned}$$

где  $A$  – результат интерполяции амплитуды комплексного числа,  $\hat{H}(k_x, k_z)$  рассчитано по формулам (9),  $\hat{H}'(k_x, k_z)$  – уточнённое значение спектра изображения.

## Линейная интерполяция в случае совпадения сетки голограмм и итогового изображения по оси $x$

В случае совпадения шагов сеток голограмм и итогового изображения по оси  $x$  для уменьшения количества вычислений можно использовать линейную интерполяцию только вдоль оси  $k_z$ . Это позволит упростить вычисления, по сравнению с кусочно-линейной интерполяцией по треугольнику, а, согласно Рис. 8, на качество итогового изображения практически не повлияет.

## Интерполяция взвешенной суммой значений по четырем точкам

Для улучшения качества можно использовать интерполяцию взвешенной суммой значений [15] по общей формуле (10).

$$\hat{H}(k_x, k_z) = \frac{\sum_{q=0}^Q \frac{1}{d_q} H_q}{\sum_{q=0}^Q \frac{1}{d_q}} \quad (10)$$

где  $H_q$  – известное значение функции,  $d_q$  – расстояние от точки интерполяции до точки с известным значением функции.

На практике интерполяция с  $Q > 4$  используется редко, так как при увеличении порядка шаблона увеличивается объем вычислений и ухудшаются качества интерполяционных операторов (в смысле устойчивости) [15].

Алгоритм проведения интерполяции такой же как и в случае применения кусочно-линейной интерполяции по треугольнику. Только в данном случае четырехугольник не разбивается на два треугольника, а рассчитываются расстояния ( $d_0, d_1, d_2, d_3$ ) от его углов до точки, в которую производится интерполяция, принадлежащую его области. Интерполяция спектров голограмм производится по формулам (11).

$$\hat{H}^{Re}(k_x, k_z) = \frac{\frac{1}{d_0} H^{Re}(k_{x0}, k_{z0}) + \frac{1}{d_1} H^{Re}(k_{x1}, k_{z1}) + \frac{1}{d_2} H^{Re}(k_{x2}, k_{z2}) + \frac{1}{d_3} H^{Re}(k_{x3}, k_{z3})}{\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}}$$

$$\hat{H}^{Im}(k_x, k_z) = \frac{\frac{1}{d_0} H^{Im}(k_{x0}, k_{z0}) + \frac{1}{d_1} H^{Im}(k_{x1}, k_{z1}) + \frac{1}{d_2} H^{Im}(k_{x2}, k_{z2}) + \frac{1}{d_3} H^{Im}(k_{x3}, k_{z3})}{\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}} \quad (11)$$

$$\hat{H}(k_x, k_z) = \hat{H}^{Re}(k_x, k_z) + i\hat{H}^{Im}(k_x, k_z)$$

Данный метод интерполяции хорошо работает для точек расположенных на примерно одинаковых расстояниях от точек, где известны значения функции  $H_q$ . К сожалению

нию, для точек на линиях соединяющих точки, где известны значения функции  $H_q$ , интерполяция взвешенной суммой даёт очень большую ошибку.

### **Сравнение различных методов интерполяции**

Было проведено сравнение различных видов интерполяции по максимальному отклонению и максимальному среднеквадратическому отклонению значений, полученных в результате интерполяции, от точных значений функции вида  $e^{-ik_x x - ik_z z}$ . На Рис. 8 представлены результаты сравнения, приведенные к максимальной ошибке.

Рис. 8

По Рис. 8 видно, что при использовании линейной или кусочно-линейной интерполяции по треугольнику полученное изображение значительно меньше будут отличаться от идеального, чем при использовании интерполяции нулевого порядка и интерполяции по четырехточечному шаблону. Поэтому данный вид интерполяции и был выбран для уменьшения ошибок работы метода ПСП.

## **Численный эксперимент**

### **Эхосигналы от четырех точечных отражателей**

Для проверки работы алгоритмов интерполяции были получены расчетным путем эхосигналы от четырех точечных отражателей в совмещенном режиме сбора данных. При расчетах полагалось, что ПЭП излучает сферические волны, так же как и точечные отражатели.

На Рис. 9 представлены изображения, полученные методом ДПФ (слева), методом ПСП с линейной интерполяцией (посередине) и методом ПСП с интерполяцией нулевого порядка (справа). При нулевом угле ракурса и совпадающими шагами голограммы и изображения, когда нет ошибок интерполяции по оси  $x$ , уровень шума вблизи отражателей невысок. Изображение, полученное методом угловых спектров при нулевом ракурсе и совпадающих шагах сеток, идентично изображению, полученному методом ДПФ, поэтому оно не приводится. Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображений увеличена на 14 дБ.

Рис. 9

При использовании ДПФ шум, обусловленный применением интерполяции, отсутствует; интерполяция нулевого порядка дает пиковое значения шума в изображении - 21 дБ, среднее значения шума -33 дБ; линейная интерполяции дает пиковое значение шума -33 дБ, среднее значение шума -40 дБ.

На Рис. 10 представлены изображения, полученные по тем же эхосигналам что и ранее, но при задании угла ракурса  $27^\circ$ . Слева показан результат работы ДПФ, в середине – ПСП с кусочно-линейной интерполяцией по треугольнику, справа – ПСП с интерполя-

Рис. 10

цией нулевого порядка. Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображений увеличена на 14 дБ.

При использовании ДПФ шум, обусловленный применением интерполяции, отсутствует; интерполяция нулевого порядка дает пиковые значения шума в изображении -9 дБ, среднее значение шума -30 дБ; кусочно-линейная интерполяция по треугольнику дает пиковое значение шума -23 дБ, среднее значение шума -40 дБ.

Ситуация когда возникает необходимость учитывать угол единственного ракурса, возникает например, при получении изображений продольных швов на трубопроводах. В этом случае с двух сторон от шва выполняется пересчет голограмм с окружности на линию касательную к ней. Для того чтобы получить изображение с двух сторон в единой системе координат, ракурс считается повернутым на заданный угол по отношению к абсолютной системе координат.

На Рис. 11 представлены изображения, полученные по тем же эхосигналам, что и изображения на Рис. 9 и Рис. 10, но при увеличенном шаге сетки изображения по оси  $x$  в 1.4 раза. Слева показан результат работы ДПФ, в середине – ПСП с кусочно-линейной интерполяцией по треугольнику, справа – ПСП с интерполяцией нулевого порядка. Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображений была увеличена на 14 дБ.

Рис. 11

При использовании ДПФ шум, обусловленный применением интерполяции, отсутствует; интерполяция нулевого порядка дает пиковые значения шума в изображении -5 дБ, среднее значение шума -30 дБ; кусочно-линейная интерполяция по треугольнику дает пиковое значение шума -24 дБ, среднее значение шума -40 дБ.

## Модельные эксперименты

### Ось колесной пары

На Рис. 12 представлен эскиз образца оси колесной пары, представляющий собой цилиндр радиусом 87 мм с просверленными отверстиями диаметром 2, 3 и 10 мм.

Рис. 12

На Рис. 13 представлены изображения (справа – ПСП с интерполяцией нулевого порядка, слева – ПСП с кусочно-линейной интерполяцией по треугольнику), восстановленные по эхосигналам, полученным на этом образце. Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображения увеличена на 10 дБ.

Рис. 13

На обоих рисунках отчетливо видны блики от отверстий диаметром 10 и 3 мм. Блики от трех отверстий диаметром 3 мм слились и смешались с бликами, соответствующими

щими сигналам переотражения между этими отверстиями из-за отсутствия в алгоритме ПСП учета многократных перерасеяний в среде.

Интерполяция нулевого порядка дает пиковые значения шума в изображении -16 дБ, средний уровень шумов -27 дБ; кусочно-линейная интерполяция по треугольнику дает пиковые значения шума в изображении -20 дБ, средний уровень шумов -33 дБ.

### **Продольный шов гиба Ду500**

На Рис. 14 представлены изображения образца продольного шва гиба Ду500 (справа – ПСП с интерполяцией нулевого порядка, слева – ПСП с кусочно-линейной интерполяцией по треугольнику). Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображения увеличена на 10 дБ. Сигналы от дефектов (отверстие бокового сверления в шве и пропилы перед швом и за швом) отчетливо видны на обоих изображениях. Также на изображениях присутствуют блики, повторяющие форму внешней поверхности трубы, обусловленные реверберационными помехами в призме ПЭП и сигналами, отраженными от границы раздела сред. На продольных швах особенно проявился эффект применения кусочно-линейной интерполяции. Ложные блики с амплитудой порядка 20% от максимальной, повторяющие контуры поверхности трубопровода устранены.

Рис. 14

### **Образец сварного соединения с естественной трещиной в наплавке**

Образец, эскиз которого представлен на Рис. 15, представляет собой модель сварного соединения большой толщины с наплавкой. В образце имеется трещина естественного происхождения, расположенная в шве и в основном металле. Также в образце выполнены следующие отражатели: галтель, пропил от галтели и отверстие бокового сверления (модель объемного отражателя).

Рис. 15

На Рис. 16 представлены изображения, полученные методом угловых спектров (слева), методом ПСП с линейной интерполяцией (посередине) и методом ПСП с интерполяцией нулевого порядка (справа). На восстановленных изображениях серыми пунктирными линиями показаны границы шва, естественный и искусственный дефекты. Для подчеркивания бликов с малыми амплитудами контрастность изображения увеличена на 10 дБ. На изображениях отчетливо виден сигнал от дна образца, в местах, где его не затеняют дефекты, также видны сигналы от заложенных дефектов. Повторяющееся изображение дна и дефектов на глубине около 210.0 мм обусловлено переотражениями ультразвука между стенками образца малой ширины.

Рис. 16

При использовании интерполяции нулевого порядка амплитуда шума сопоставима с амплитудой сигналов дифракции от вершин плоскостных дефектов. При использова-

нии МУС средний уровень шума в изображении составляет -33 дБ; интерполяция нулевого порядка дает пиковое значения шума в изображении -7 дБ, среднее значения шума составляет -20 дБ; линейная интерполяция дает пиковое значение шума -16 дБ, среднее значение шума составляет -26 дБ.

## **Выводы**

Для повышения качества изображений, восстановленных методом ПСП целесообразно использовать алгоритмы интерполяции на этапе проекции в спектральном пространстве. Рекомендовано использовать линейную или кусочно-линейную интерполяцию по треугольнику. При ее использовании отношение сигнал шум по сравнению с интерполяцией нулевого порядка увеличивается в среднем на 5-6 дБ. Время на получение изображения при использовании интерполяции увеличивается несущественно, не более чем на 10%. Изображение, полученное методом ДПФ свободно от ошибок интерполяции, однако время на обработку, при его использовании, неприемлемо высоко.

Авторы выражают благодарность Самарину П.Ф. за проведение экспериментов по регистрации эхосигналов в образце сварного соединения с трещиной, Коваль Д.А. за ценные замечания, высказанные при подготовке этой статьи.

## Рисунки

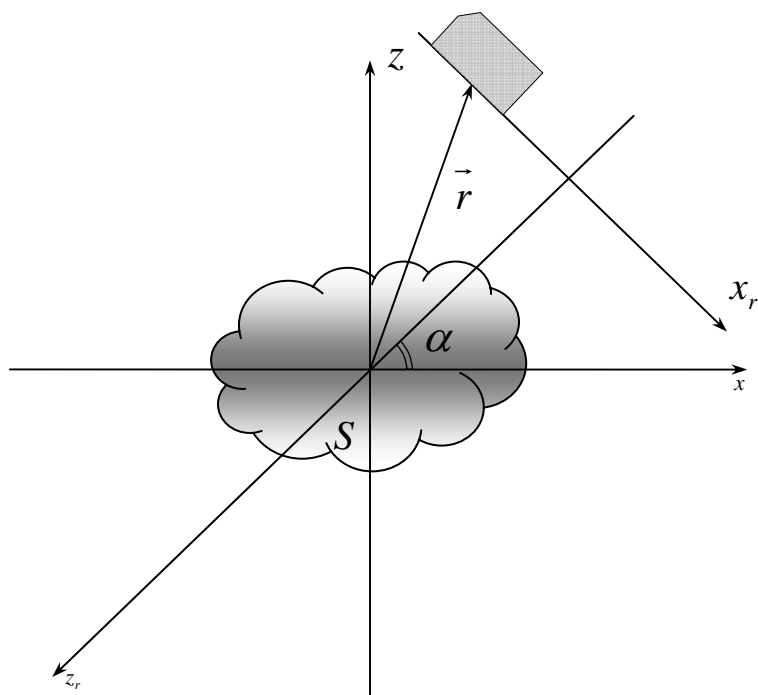


Рис. 1 Схема сбора данных об отражателях в области  $S$  в совмещенном режиме. Угол ракурса  $\alpha$  в общем случае не равен нулю.

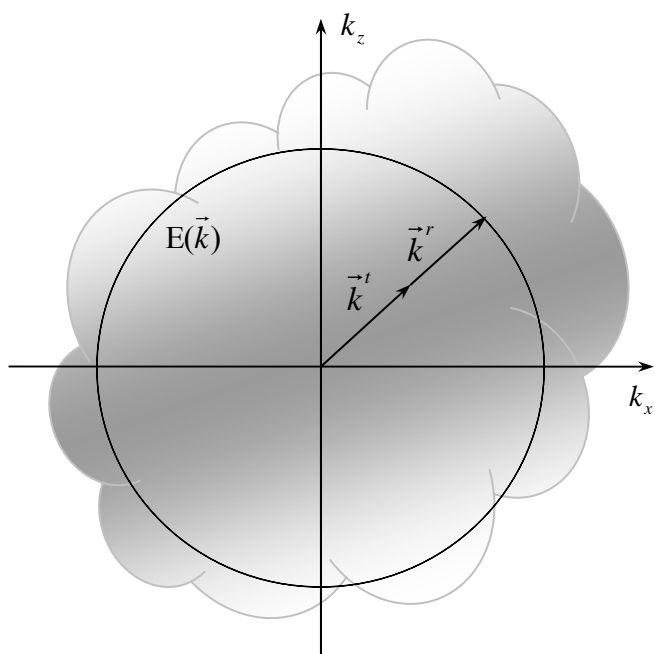


Рис. 2 Структура спектра изображения, сплошной линией показана сфера Эвальда, на которой вычисляется спектр изображения по голограммам на одной частоте при многоракурсной регистрации.

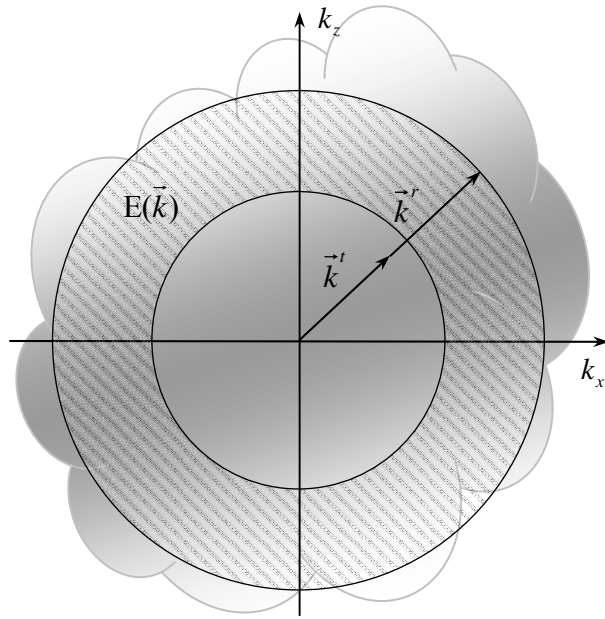


Рис. 3 Структура спектра изображения. Косой штриховкой показана часть спектра изображения вычисляемая по многочастотным голограммам при многоракурсной регистрации.

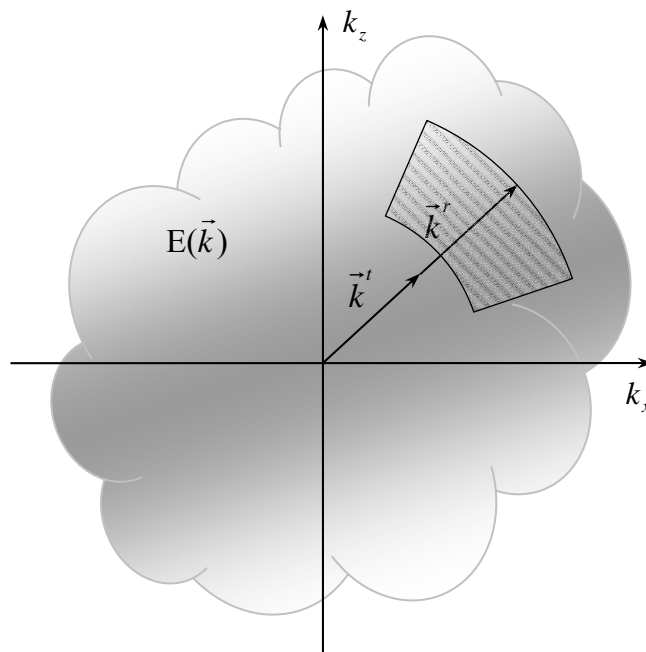


Рис. 4 Структура спектра изображения. Косой штриховкой показана часть спектра изображения вычисляемая по многочастотным голограммам при регистрации с одним ракурсом.

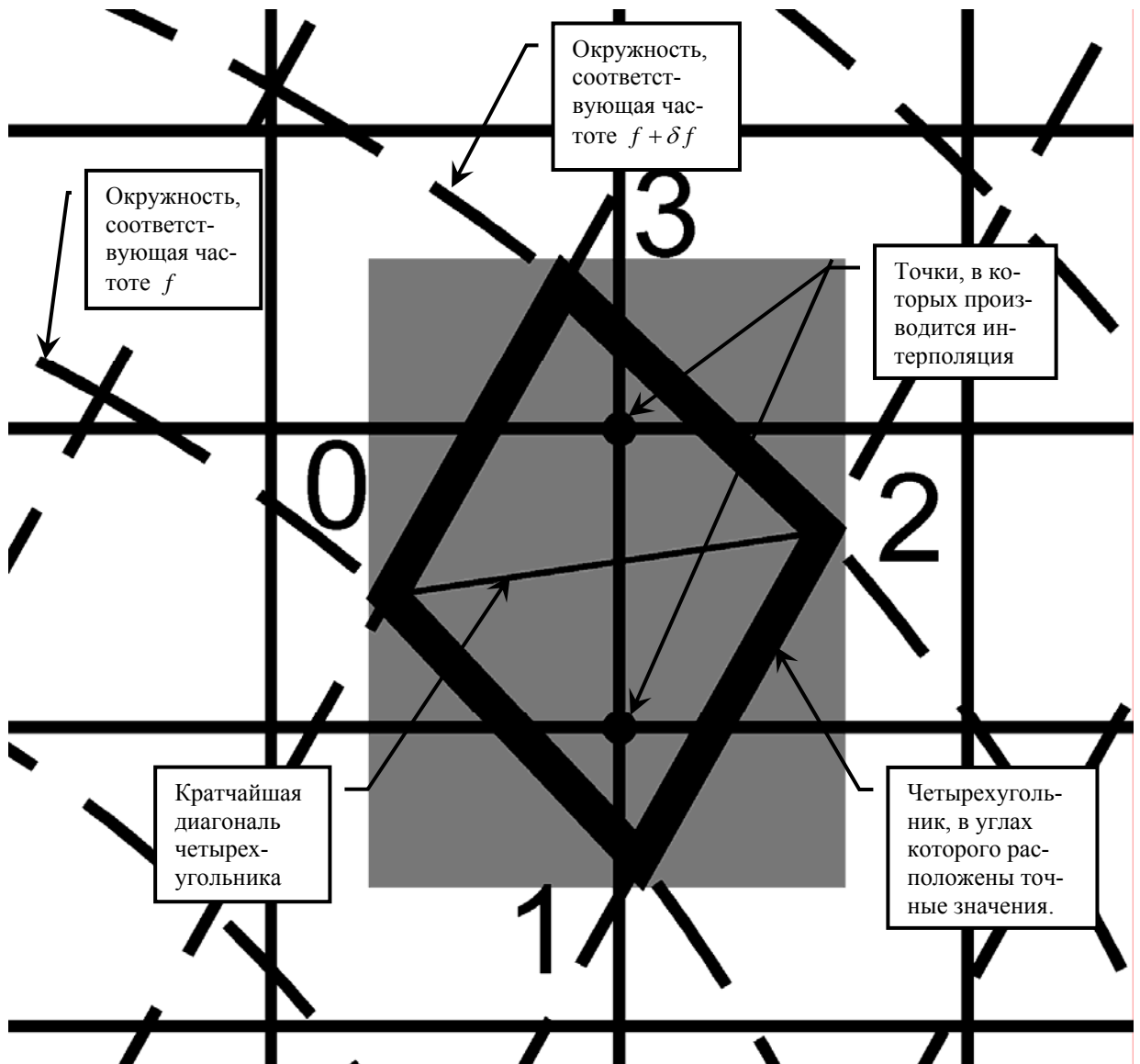


Рис. 5 Иллюстрация для объяснения принципа работы кусочно-линейной интерполяции. Черными пунктирными линиями отмечена сетка со значениями спектра голограмм, черные сплошные линии – сетка спектра изображения. Толстые черные линии – четырехугольник, в пределах которого проводится интерполяция

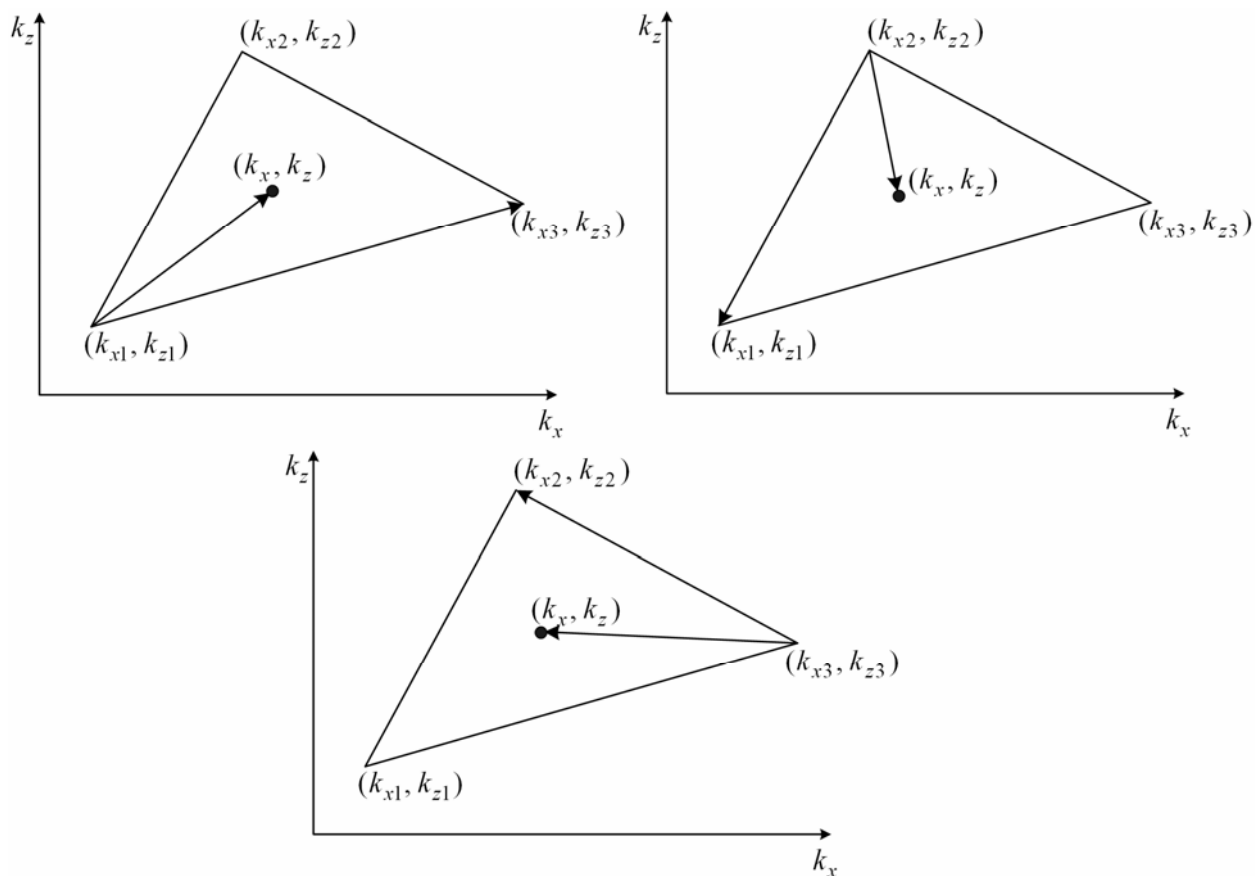


Рис. 6 Иллюстрация к алгоритму определения принадлежности точки области треугольника с помощью векторных произведений

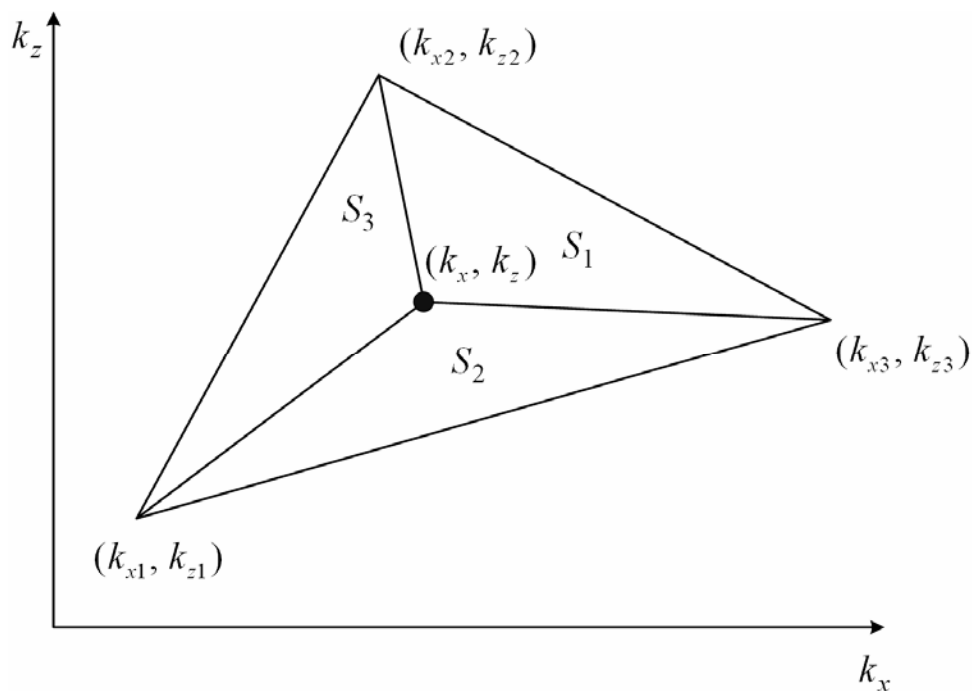


Рис. 7 Кусочно-линейная интерполяция функции двух переменных по треугольнику.

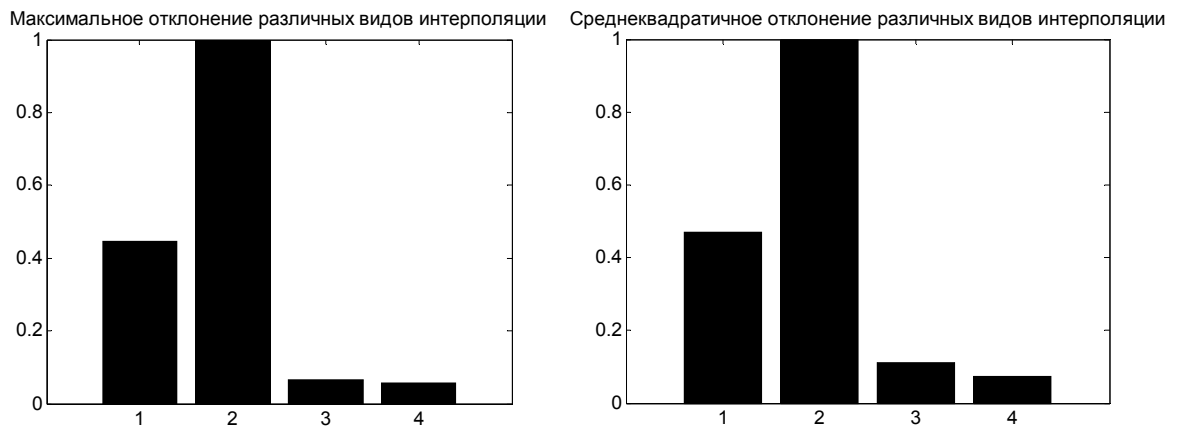


Рис. 8 Приведенные к максимальной ошибки, возникающие при выполнении проекции в спектральном пространстве: 1 – интерполяция нулевого порядка; 2– интерполяция по четырехточечному шаблону; 3 – линейная интерполяция; 4 – кусочно-линейная интерполяция по треугольнику.

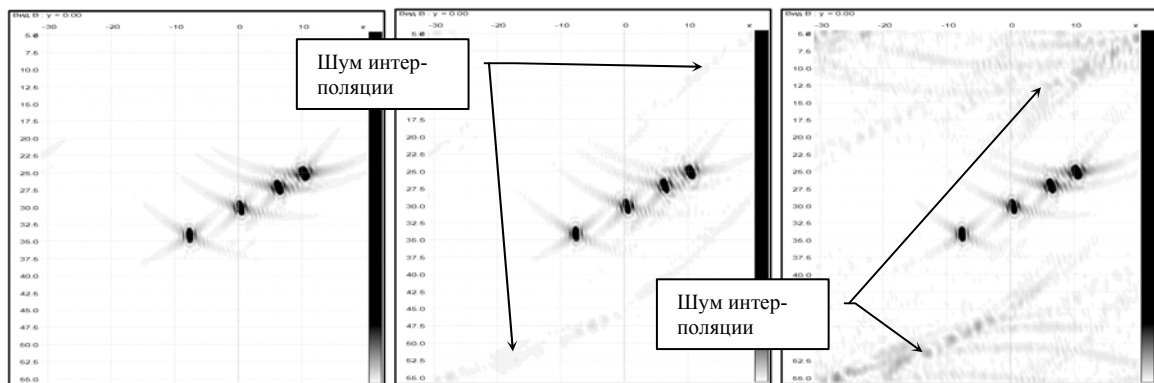


Рис. 9 Изображения, полученные по расчетным экосигналам от четырех точечных дефектов. Угол ракурса  $0^\circ$ . Размеры шагов по оси  $x$  голограмм и изображения равны.

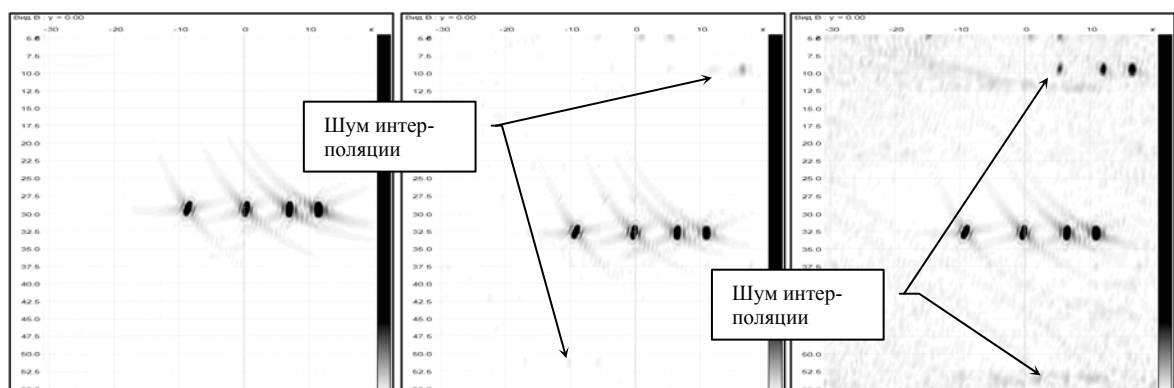


Рис. 10 Изображения, полученные по расчетным экосигналам от четырех точечных дефектов. Угол ракурса  $27^\circ$ . Размеры шагов по оси  $x$  голограмм и изображения равны.

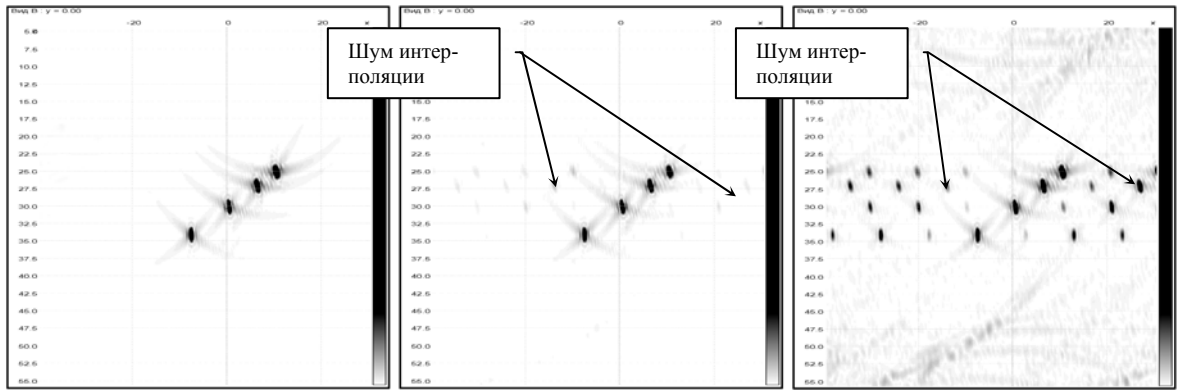


Рис. 11 Изображения, полученные по расчетным эхосигналам от четырех точечных дефектов. Угол ракурса  $0^\circ$ . Размеры шагов по оси  $x$  голограмм и изображения не совпадают.

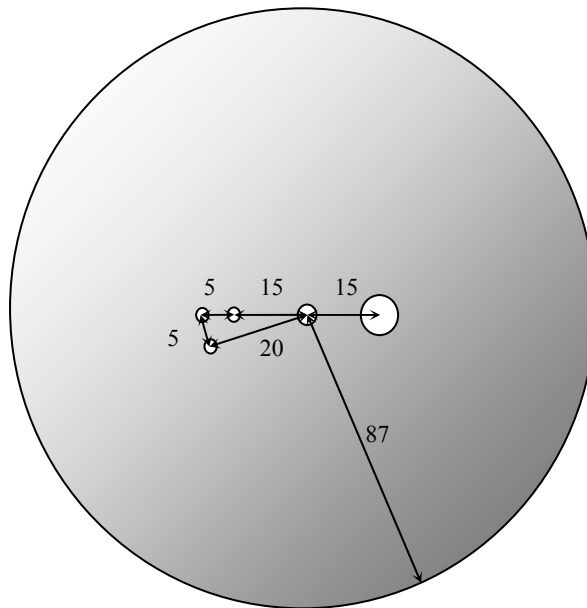


Рис. 12 Эскиз образца оси колесной пары, в которой просверлены отверстия диаметром 2, 3, 10 мм.

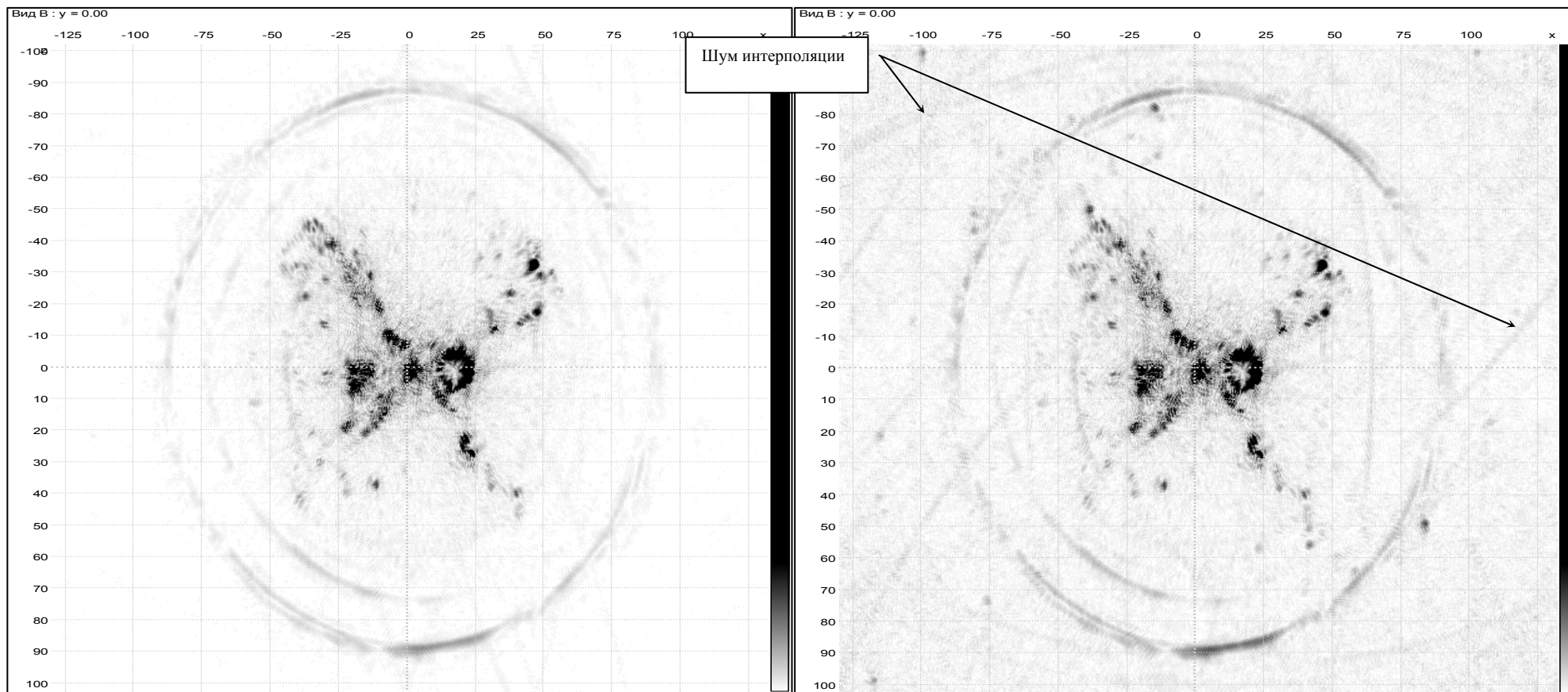


Рис. 13 Результат восстановления изображения образца оси колесной пары.

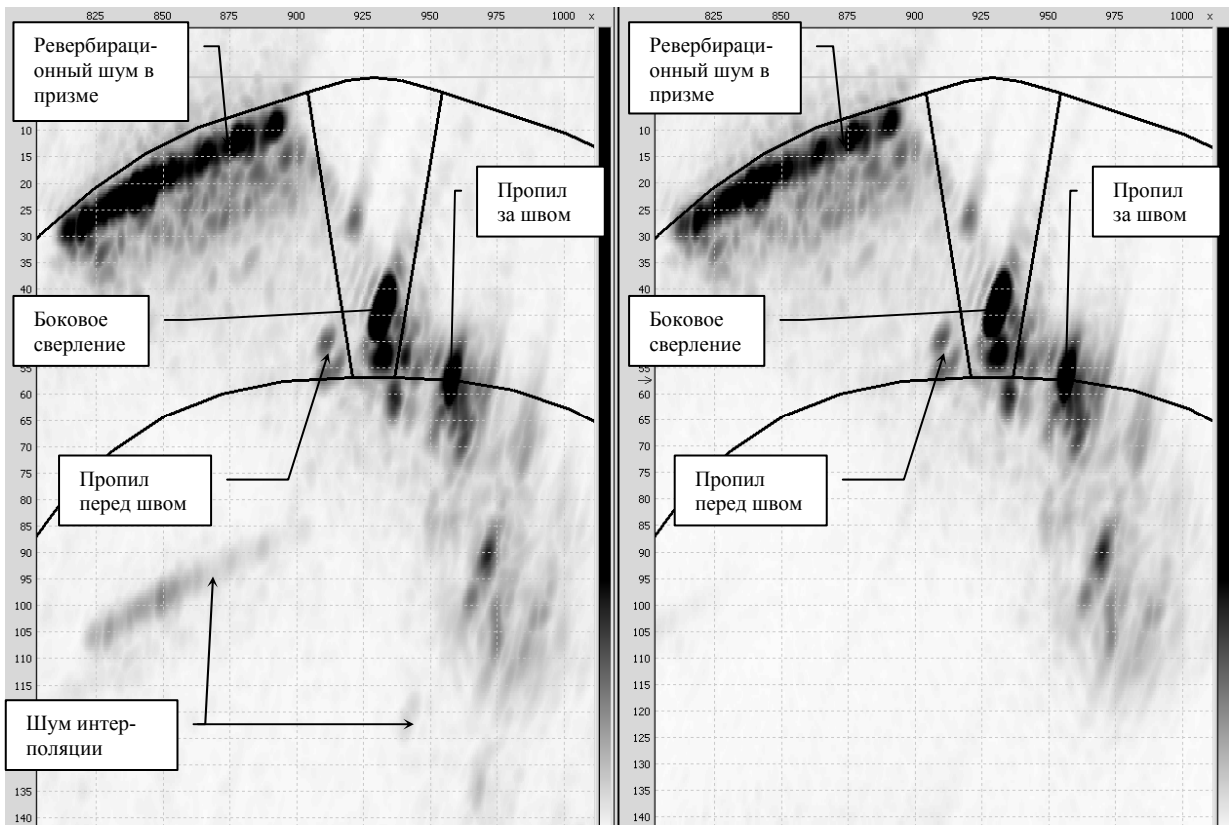


Рис. 14 Изображения сечения продольного шва гiba Ду500.

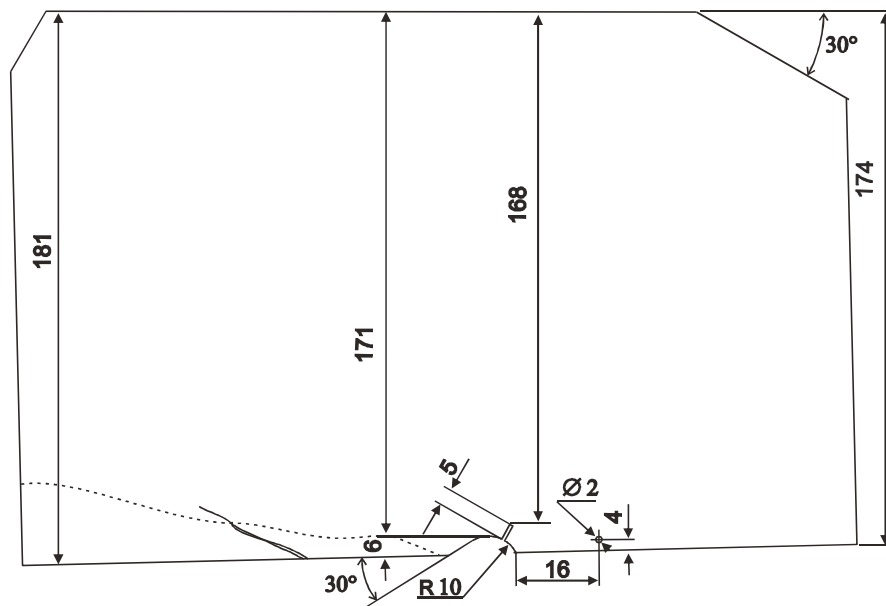


Рис. 15 Эскиз образца сварного соединения с естественной трещиной в наплавке.

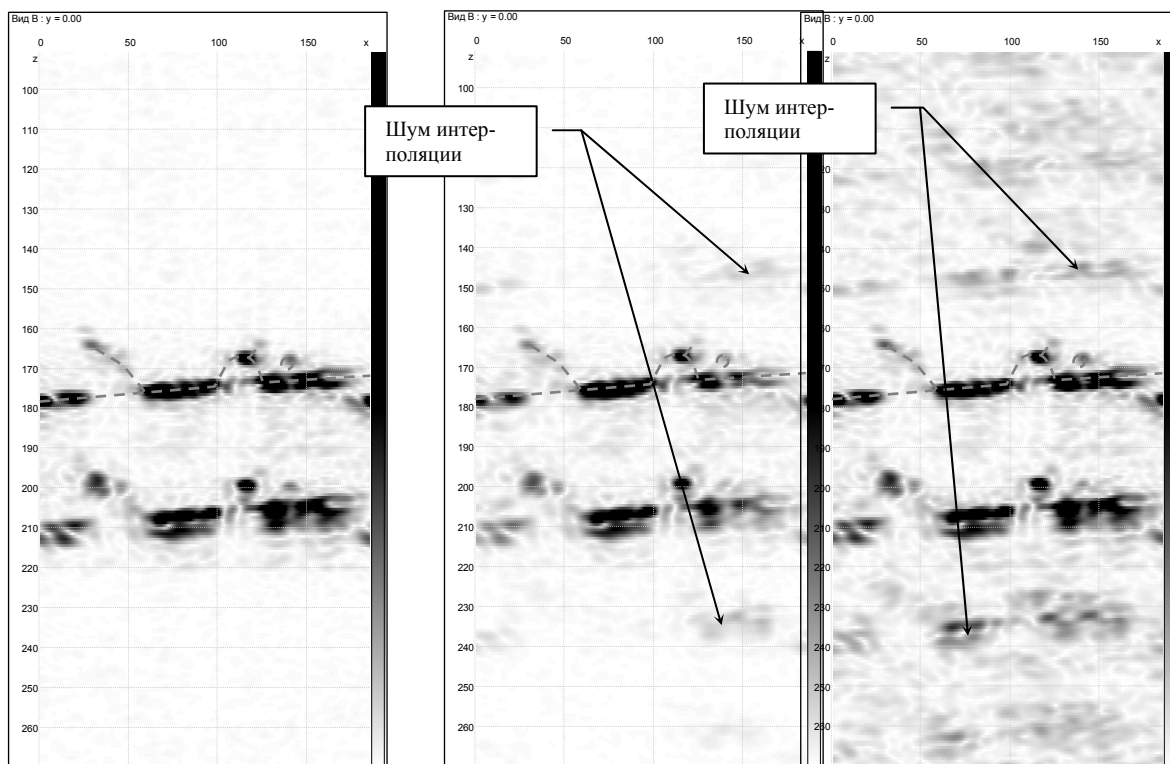


Рис. 16 Результат восстановления изображений образца сварного соединения. Серыми пунктирными линиями показаны границы шва, естественный и искусственный дефекты.

## Список литературы

---

- 1 Hall T.E., Doctor S.R., Reid L.D., Littfield R.J., Gilber R.W. Implementation of real-time ultrasonic SAFT system for inspection of nuclear reactor components. - Acoustical Imaging, 1987, V. 15, p. 253-266.
- 2 Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности виртуальной динамической фокусировки в ультразвуковой дефектоскопии. – Тезисы конференции УЗДМ 2009 «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций», Санкт-Петербург, 2009, с. 14-15.
- 3 Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналом методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. – Дефектоскопия, 2009, №2, с.18-32
- 4 Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М: Мир, 1970, с. 364.
- 5 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. - Акустический журнал, 1988, XXXIV, № 2, с. 222-231.
- 6 Вайнберг Э.И., Файнгойз М.Л. Влияние дискретизации и интерполяции проекции на чувствительность рентгеновской вычислительной томографии. I. Дискретизация по углу. – Дефектоскопия, 1984, №6, с.24-33.
- 7 Вайнберг Э.И., Файнгойз М.Л. Влияние дискретизации и интерполяции проекции на чувствительность рентгеновской вычислительной томографии. II. Погрешности дискретизации и интерполяции проекций. – Дефектоскопия, 1984, №7, с.28-38.
- 8 Вайнберг Э.И., Файнгойз М.Л. Оптимальная дискретизация и интерполяция проекций в рентгеновской вычислительной томографии. – Дефектоскопия, 1984, №8, с.49-59.
- 9 Буров В.А., Горюнов А.А., Сасковец А.В., Тихонова Т.А. Обратные задачи рассеяния в акустике (обзор). – Акустический журнал, 1986, т. XXXII, № 4, с. 433-449.
- 10 Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. - М.: Издательство МГУ, 1989. - 152 с.
- 11 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Использование трансформированных волн для получения изображения вертикальных трещин по многочастотным акустическим голограммам. - Дефектоскопия, 1993, № 6, с. 3-9.
- 12 Devaney A.J. Fundamental limitation inverse source and scattering problem in NDT. – Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 1986, vol. 5A, p. 303-317.

- 
- 13 Иванов Д.В., Карпов А.С., Кузьмин Е.П., Лемпицкий В.С., Хропов А.А.  
Алгоритмические основы растровой машинной графики. – Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007 г., 286 с.
- 14 Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра: Учебник для вузов. - 6-е изд., стер. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 280 с.
- 15 Рычагов М.Н. Учет многократных рассеяний в акустических обратных задачах томографического типа, Московский Государственный Университет, диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, 1989 г.