

# **Применение гомоморфной фильтрации для повышения качества изображения дефектов при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС**

Бадалян В.Г., Базулин Е.Г.

В работе рассмотрена возможность применения гомоморфной фильтрации ультразвуковых эхосигналов, как метода предварительной обработки данных, для улучшения качества изображений дефектов, полученных при когерентной обработке эхосигналов. Гомоморфная фильтрация позволяет уменьшить влияние мультипликативных помех таких, как изменение акустического контакта или неровная поверхность объекта контроля возникающих при регистрации данных.

Получение изображений состоит из следующих этапов: расчета голограмм по измеренным эхосигналам, логарифмирования рассчитанных голограмм, нахождения спектра голограмм, операции проекции в спектральном пространстве и преобразования Фурье.

В работе приведены результаты практического применения гомоморфной фильтрации при экспертной оценке размеров дефектов в аустенитных сварных швах трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325×15 мм.

## **1. Введение**

Применение методов когерентной обработки ультразвуковых эхосигналов для получения высококачественных изображений дефектов встречает ряд практических трудностей, связанных с такими факторами, как изменение акустического контакта в областях измерений, неровность поверхности изделия. Обычно в алгоритмах восстановления изображений [1, 2] не учитывается их искажающее влияние, предполагая, что поверхность регистрации гладкая, а нарушения акустического контакта отсутствуют. Как известно [3], неровность поверхности регистрации может привести к существенному искажению восстановленного изображения дефекта, и, как следствие, к ошибке определения его размеров, к появлению ложных изображений. К аналогичным результатам приводит нарушение акустического контакта на большей части области измерения эхосигналов. Ошибки в работе сканера, сказывающиеся как в случайной, так и периодической погрешности позиционирования приводит существенному уровню шума в изображении и появлению ложных изображений [4]. Перечисленные помехи имеют мультипликативный характер и не устраняются обычными линейными фильтрами.

В работе [5] рассматривается метод гомоморфной фильтрации эхосигналов, который предназначен для уменьшения уровня мультипликативных помех. Идея его состоит в том,

что сигнал, представляющие собой произведение двух функций, подвергаются логарифмированию, то есть нелинейному преобразованию, в результате которого мультипликативная помеха превращается в аддитивную. Если спектры прологарифмированных функций имеют разные частотные спектры, то обычная линейная фильтрация спектров логарифмов приводит к повышению качества изображения и к увеличению отношения сигнал/шум.

Этот метод особенно успешно применялся для улучшения качества воспроизведения звукозаписей [5]. В последнее время его успешно используют для улучшения качества изображений [6], в частности, в медицине [7], сейсмологии [8], в дефектоскопии при контроле тонких слоистых пластиков [9].

В работе приведены результаты практического применения гомоморфной фильтрации для повышения точности оценки размеров дефектов при контроле сварных швов трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325×15 мм на атомных электростанциях России.

## 2. Гомоморфная фильтрация в ультразвуковом НК

Рассмотрим особенности применения гомоморфной фильтрации при получении изображений методами когерентной обработки данных. Так как импульсный режим излучения можно рассматривать как сумму измерений на разных частотах в диапазоне  $(f_{\min}, f_{\max})$  [10], для простоты далее будем рассматривать случай непрерывного излучения на частоте  $f_m$  с волновым числом  $k_m = \frac{2\pi f_m}{c}$ , где  $c$  - скорость звука в среде со скоростью  $c$ . Также с целью упрощения, будем рассматривать двумерный случай, когда ультразвуковой преобразователь, работающий в совмещенном режиме, перемещается вдоль линии  $x$ , совпадающей с поверхностью объекта контроля.

В дальнейшем мы будем рассматривать результаты применения гомоморфной фильтрации с использованием одноркурсного варианта метода проекции в спектральном пространстве (далее ПСП) [1]. Этот метод является одним из методов когерентного восстановления изображений. Он устанавливает связь между спектром двумерной функции  $h(x, z)$ , характеризующей границу дефекта, и одномерными спектрами измеренного на поверхности объекта контроля рассеянного поля  $h(x, k_m)$  на частоте  $f_m$  в заданном диапазоне частот  $(f_{\min}, f_{\max})$ . Если поверхность объекта плоская, нарушений акустического кон-

такта и шума нет, а сканирующее устройство точно позиционирует преобразователь, то  $h(x, k_m)$  – описывает идеальное распределение рассеянного поля.

Информация о дефектах представляет собой восстановленную комплексную функцию  $h_{rec}(x, z)$ , характеризующую амплитуду источников рассеянного поля.

Изображение дефектов восстанавливается методом ПСП по следующим формулам:

$$h_{rec}(x, z) = \mathfrak{F}_2^{-1}[H_D(k_x, k_z)] \quad (1)$$

$$H_D(k_x, k_z) = \sum_{m=1}^M 2k_m P_m [H_m(k_x)] \quad (2)$$

$$H_m(k_x) = \exp(iR\sqrt{4k_m^2 - k_x^2}) \mathfrak{F}[h(x, k_m)] \quad (3)$$

Здесь  $2k_m \sin(a_{in} - \Delta a) < k_x < 2k_m \sin(a_{in} + \Delta a)$ ,  $k_m = 2p f_m / c$  – волновое число,  $a_{in}$  – угол ввода ультразвукового пучка преобразователем,  $2\Delta a$  – угол раскрытия преобразователя,  $\mathfrak{F}$ ,  $\mathfrak{F}_2^{-1}$  – операторы прямого одномерного и двумерного обратного преобразования Фурье,  $R$  – расстояние от линии регистрации рассеянного поля до центра области, в которой рассчитывается изображение. Оператор проекции  $P_m$  переносит в системе координат  $k_x k_z$  значение функции  $H(k_x)$  из точки  $(k_x, 0)$  в точку  $(k_x, \sqrt{4k_m^2 - k_x^2})$ . Как следует из (2) информация о спектре функции  $h_{rec}(x, z)$  определяется в ограниченной области  $D$  и отражает тот факт, что преобразователь является пространственно-временным фильтром. На рис. 1 видно, что область  $D$  пространственных частот представляет собой часть кольца с угловым размером, определяемым углами  $2\Delta a$ ,  $a_{in}$  и толщиной  $\Delta k = k_{max} - k_{min}$ . Очевидно, что для идеального изображения дефекта необходимо получить информацию о функции  $H_D(k_x, k_z)$  на как можно большей области  $D$ , то есть использовать точечный ненаправленный преобразователь с бесконечной полосой пропускания, для которого  $\Delta a = 90^\circ$ ,  $f_{min} = 0$  МГц, а  $f_{max} = \infty$  МГц. В этом случае область  $D$  представляет собой полупространство.

Рис. 1

Если неизбежные шумы  $n(x, k_m)$ , возникающие при регистрации рассеянного поля, аддитивны и близки к белому шуму

$$h_n(x, k_m) = h(x, k_m) + n(x, k_m),$$

то при когерентном восстановлении изображения дефектов отношение сигнал/шум значительно повышается. Однако в присутствии мультипликативного шума, когда измеренное рассеянное поле можно представить в виде

$$h_n(x, k_m) = h(x, k_m)n(x, k_m)$$

повышение отношения сигнал/шум не наблюдается. Шумы подобного типа возникают из-за плавной потери акустического контакта и вследствие неровности поверхности для случая параксиального приближения. Так как в спектральной области произведение двух функций  $h(x, k_m)$  и  $n(x, k_m)$  равно свертке их спектров  $H(k_x, k_m) \otimes N(k_x, k_m)$  [11], то использование методов фильтрации не позволяет достигнуть положительного эффекта из-за смешения спектров.

Использование гомоморфной фильтрации, заключающейся в логарифмировании искаженного рассеянного поля  $h_n(x, k_m)$

$$\ln(h_n(x, k_m)) = \ln(h(x, k_m)) + \ln(n(x, k_m))$$

позволяет перевести мультипликативную помеху в разряд аддитивных помех. В этом случае формулу (3) можно переписать в виде

$$H_m(k_x) = \exp(iR\sqrt{4k_m^2 - k_x^2})\mathfrak{F}[\ln(h(x, k_m))].$$

Поэтому, после проведения пространственной фильтрации и антилогарифмирования голограмм, качество изображения должно повыситься, особенно в случае использования наклонного преобразователя.

### 3. Примеры использования гомоморфной фильтрации

#### 3.1. Ухудшение акустического контакта

Рассмотрим случай плавной потери акустического контакта, что приводит к нежелательному изменению амплитуды измеренной голограммы. Потерю акустического контакта будем описывать следующей функцией

$$n(x) = n(x, k_m) = 1 - h e^{-p \frac{x^2}{s^2}},$$

где  $h \in [0, 1]$  определяет степень потери контакта (чем ближе  $h$  к 1, тем больше потеря контакта), а  $s$  определяет размеры области потери контакта  $[-s, s]$  по уровню  $1 - e^{-p} \approx 96\%$ . Спектр функции  $n(x)$  легко рассчитывается аналитически и равен

$$N(k_x) = \mathfrak{F}(n(x)) = 2pd(k_x) - hse^{p\left(\frac{k_x s}{2}\right)^2},$$

где  $d(k_x)$  – дельта функция Дирака. Очевидно, что чем больше область  $S$  ухудшения контакта, тем больше энергии функции  $N(k_x)$  сосредоточено в области низких пространственных частот. Спектр функции  $\ln(n(x))$  не вычисляется аналитически, но то обстоятельство, что вид функции  $\ln(n(x))$  достаточно близок к виду функции  $n(x)$  и плавно меняется, позволяет сделать вывод, что энергия функции  $\Im(\ln(n(x)))$  в основном расположена в низкочастотной области  $N$ , изображенной на рис. 1.

На практике часто применяют наклонные преобразователи с углом ввода ультразвукового пучка  $a_{in}$  с характерными значениями от 40 до 70 градусов и шириной диаграммы направленности равной  $2\Delta a$ , которая для когерентных методов обычно равна примерно 20 градусов. Пьезоэлектрические пластины таких преобразователей обычно плоские и имеют размеры  $L$  около 4 мм, что составляет около  $3 I_0$  для стали на поперечных волнах на частоте  $f_0=2,5$  МГц. Для равномерного амплитудного распределения возбуждения пьезопластины размерами  $L \times L$ , диаграмму направленности можно записать в виде [12]

$$h(a_m) \approx \frac{\sin \frac{k_0 L}{2} ((\sin(a_{in} + \Delta a) - \sin(a_{in})))}{\frac{k_0 L}{2} ((\sin(a_{in} + \Delta a) - \sin(a_{in})))}$$

Данная функция такова, что она заметно отличается от нуля в интервале углов от  $a_{min} = a_{in} - \Delta a$  до  $a_{max} = a_{in} + \Delta a$ . Такое ограничение на диапазон углов приема приводит к тому, что спектр рассеянного поля будет сосредоточен в интервале  $[k_0^{min}, k_0^{max}]$ , где  $k_0^{min} = k_0 \sin(a_{min})$  и  $k_0^{max} = k_0 \sin(a_{max})$ . Спектр логарифма рассеянного поля будет, в основном, сосредоточен в той же области  $D$  пространственных частот, что и до логарифмирования, хотя и будет более широким за счет появления новых гармоник. Таким образом, спектр логарифма рассеянного поля и спектр логарифма функции, описывающей нестабильность акустического контакта, расположены в непересекающихся областях  $D$  и  $N$  спектрального пространства  $k_x k_z$ , и, следовательно, будут эффективно фильтроваться.

На рис. 2 представлены результаты применения гомоморфной фильтрации для набора эхосигналов, полученных при нестабильном акустическом контакте. На левой панели рис. 2 представлен набор эхосигналов, измеренных в случае ухудшения акустического контакта. Области его ухудшения хорошо заметны при анализе амплитуды реверберационных шумов преобразователя в области 4 мкс. На правой панели того же рисунка представлен набор эхосигналов после применения гомоморфной фильтрации. Хорошо видно, что ам-

Рис. 2

плитуда эхосигналов стала более равномерной, а реверберационные шумы практически пропали после проведения пространственной фильтрации.

На рис. 3 представлены изображения, восстановленные по набору эхосигналов представленных на рис. 2. Изображение, представленное на левой панели полученное по искаженным эхосигналам недостаточно сфокусировано, так как потеря акустического контакта привело к уменьшению эффективной апертуры, и, следовательно, к уменьшению разрешающей способности. На правой панели того же рисунка представлено изображение, полученное по набору эхосигналов после применения гомоморфной фильтрации. Видно, что из-за повышения разрешающей способности примерно в полтора раза привела к тому, что изображение стало более информативным. В частности, изображение вершины трещины стало более заметно.

Рис. 3

Еще одна причина повышения разрешающей способности состоит в том, что гомоморфная фильтрация при логарифмировании «задирает» малые значения сигналов, что эквивалентно повышению эффективной угловой апертуры преобразователя.

### 3.2. Неровная поверхность

В простейшем случае, поле рассеянное одним точечным отражателем с координатами  $(0, z_d)$  и измеренное идеальным преобразователем в совмещенном режиме можно записать в виде

$$h(x, k_0) = \frac{e^{-i2k_m r}}{r^2},$$

где  $r = \sqrt{x^2 + z_d^2}$  расстояние от отражателя до точки расположения преобразователя. В параксиальном приближении влияние неровности поверхности регистрации можно представить в виде мультипликативного множителя

$$n(x, k_m) = e^{ik_m \Delta z(x)}, \quad (4)$$

где  $\Delta z(x)$  профиль неровности поверхности при регистрации голограммы. Для идеально ровной поверхности  $\Delta z(x) = 0$ .

Рассмотрим неровность типа  $\Delta z(x) = \sin(k_s x)$ , где  $k_s = \frac{2\pi}{I_s}$ , а  $I_s$  – период неровности.

Очевидно, что спектр логарифма функции (4) с точностью до константы совпадает со спектром функции  $\Delta z(x)$ . Поэтому, в случае плавного изменения неровности  $k_s \leq k_{\min}$  при регистрации рассеянного поля наклонным преобразователем спектры логарифма функций

$h(x, k_m)$  и  $n(x, k_m)$  находятся в разных областях спектрального пространства  $k_x k_z$  и, следовательно, будут эффективно фильтроваться.

На рис. 4 представлены результаты применения гомоморфной фильтрации для набора эхосигналов, полученных при сканировании преобразователя по неровной поверхности. На левой панели рис. 4 представлен набор эхосигналов, измеренных в случае неровной поверхности объекта контроля. Хорошо заметны волнообразные нарушения плавного течения эхосигналов. После применения гомоморфной фильтрации набор эхосигналов стал менее искаженным в сравнении с изображением на правой панели рис. 4.

Рис. 4

На рис. 5 представлены изображения, восстановленные по набору эхосигналов представленных на рис. 4. Изображение на левой панели, полученное по искаженным эхосигналам, достаточно плохого качества – оно недостаточно сфокусировано и наблюдается большой уровень «паразитных» изображений. На правой панели того же рисунка представлено изображение, полученное по набору эхосигналов после применения гомоморфной фильтрации. Видно, что качество восстановленного изображения заметно выше. Отметим также, что и разрешающая способность возросла примерно в два раза.

Рис. 5

## 4. Выводы

Применение гомоморфной фильтрации позволяет повысить качество когерентного изображения дефектов, за счет уменьшения влияния мультипликативных помех, таких как неровность поверхности регистрации рассеянного поля и нарушение акустического контакта. Полученные изображения дефектов после нелинейной гомоморфной обработки имеют более высокое продольное и поперечное разрешение, более низкий уровень боковых лепестков и артефактов.

Приведенные результаты практического применения гомоморфной фильтрации при обработке данных, полученных при контроле реальных объектов, показывают перспективность использования гомоморфной фильтрации для улучшения качества изображений дефектов.

Бадалян Владимир Григорьевич

Россия, Москва, 117292, Профсоюзная улица, д. 8, корп. 1, кв. 477, тел. 125-52-39 (д.).

Базулин Евгений Геннадиевич

Россия, Москва, 123627, Пятницкое шоссе, д. 37, кв. 476, тел. 752-31-47 (д.).



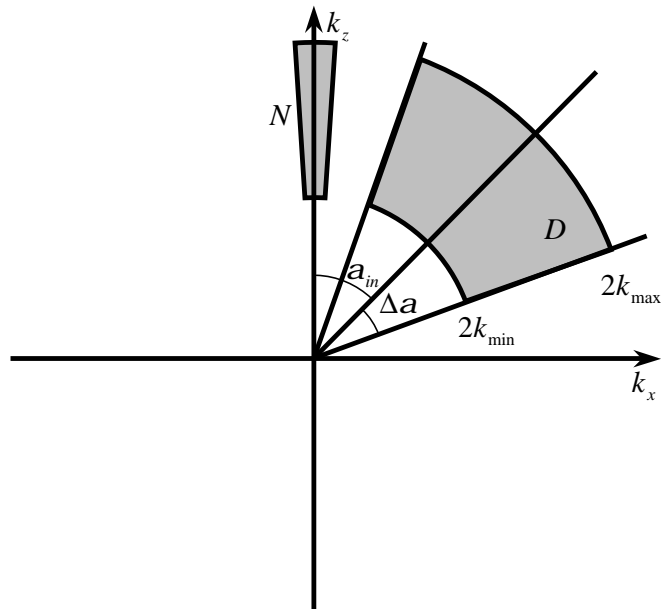


Рис. 1

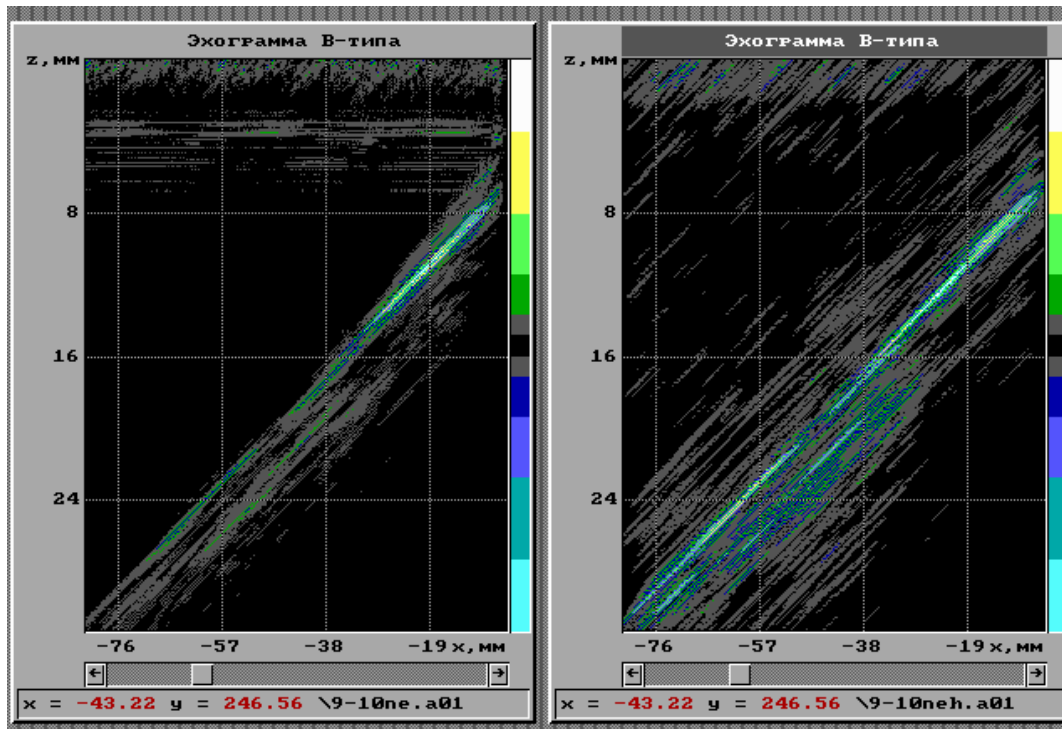


Рис. 2

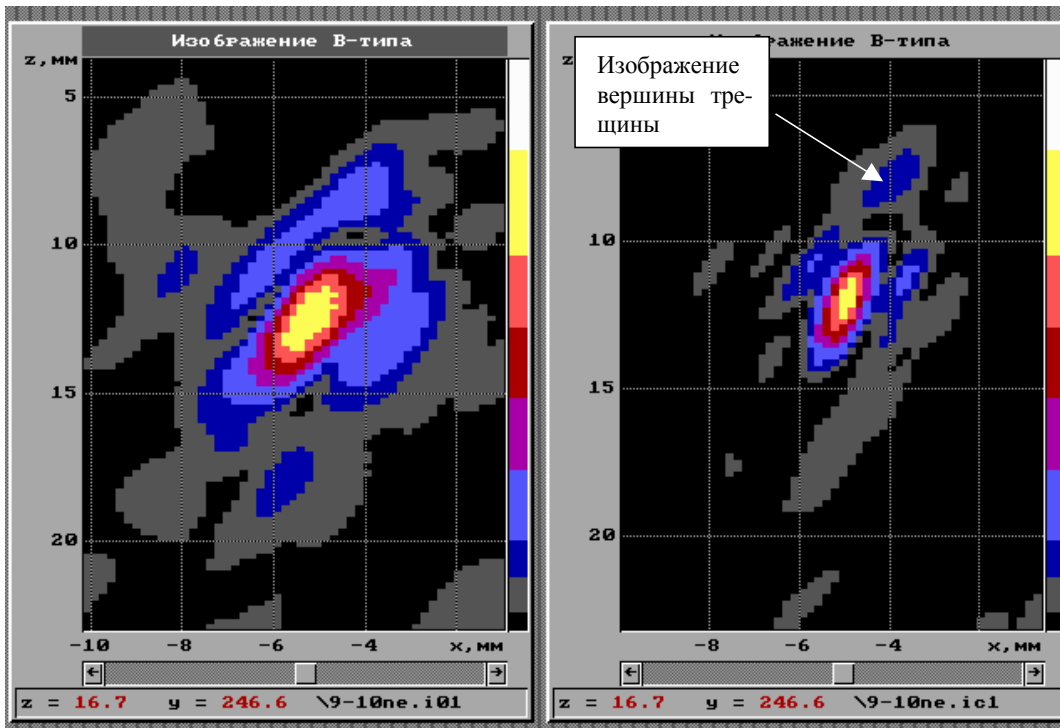


Рис. 3

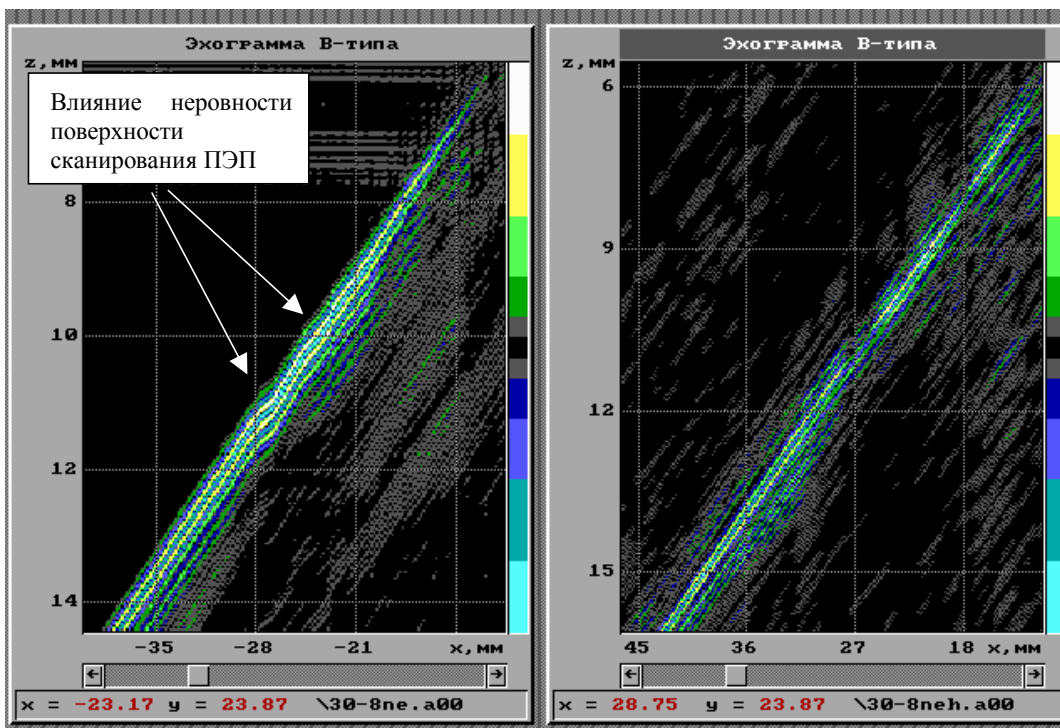


Рис. 4

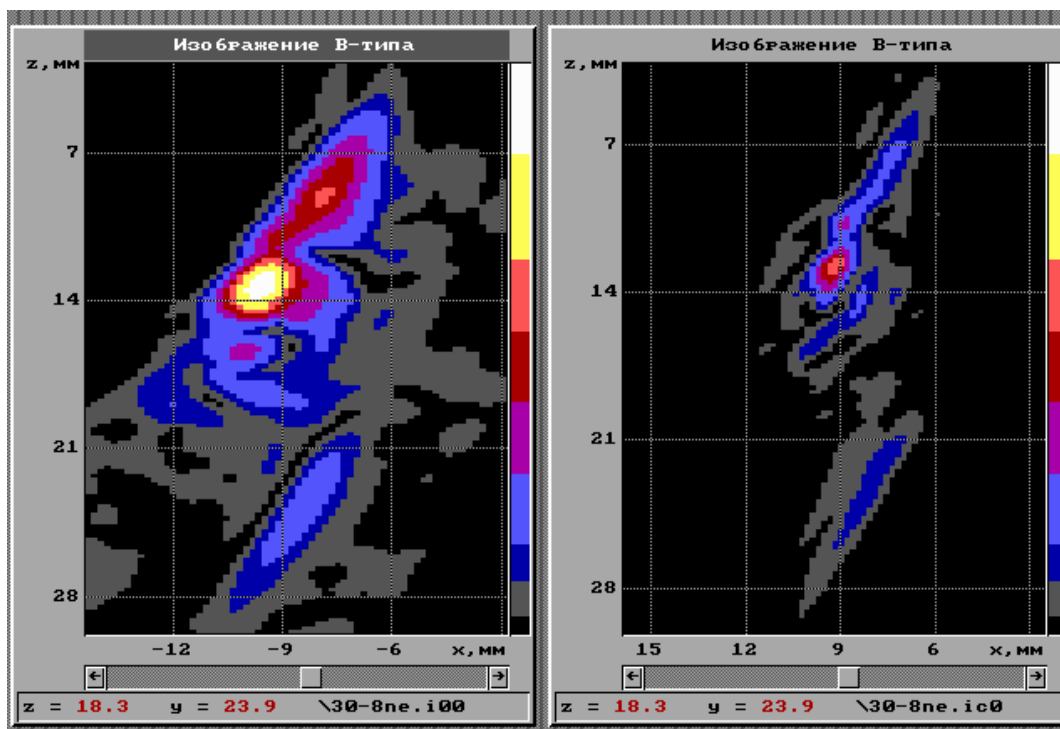


Рис. 5

## **Подписуочные надписи.**

**Рис. 1** Структура данных в спектральном пространстве для случая совмещенного режима излучения и приема.  $D$  - область расположения спектра полезного сигнала,  $N$  - область расположения логарифма спектра мультипликативной помехи.

**Рис. 2** Набор эхосигналов, полученных при нестабильном акустическом контакте (слева), результаты применения гомоморфной фильтрации (справа).

**Рис. 3** Изображения, восстановленные по набору эхосигналов представленных на рис. 2.

**Рис. 4** Набор эхосигналов, полученных при сканировании ПЭП по неровной поверхности изделия (слева), результаты применения гомоморфной фильтрации (справа).

**Рис. 5** Изображения, восстановленные по набору эхосигналов представленных на рис. 4.

## Список литературы

- <sup>1</sup> Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. – Акуст. журнал, 1988, 34, № 2, с. 222–231.
- <sup>2</sup> Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J., Kreutter T. Three-dimensional imaging system based on Fourier transformation synthetic aperture focusing technique. – Ultrasonics, 1990, 28, P. 241–255.
- <sup>3</sup> Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Влияние неровной поверхности на качество изображения в цифровой акустической голографии. – Дефектоскопия, 1989, № 11, с. 51–60.
- <sup>4</sup> Beale M.I.J. Periodic sampling errors in scanned ultrasonic holography. – In: Acoustical Imaging, v. 8, Ultrasonic visualization and characterization. New York. – London, 1980, p. 201–218.
- <sup>5</sup> Оппенгейм А. и Шафер Р. Кн. Цифровая обработка сигналов. – М.: Мир, 1979, с. 416.
- <sup>6</sup> Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. – М.: Вузовская книга, 2001, с. 320.
- <sup>7</sup> T. Taxt Comparison of Cepstrum-Based Methods for Radial Blind Deconvolution of Ultrasound Images. – IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44, № 3, p. 666–674.
- <sup>8</sup> J.M.Tribolet Seismic Application Of Homomorphic Signal Processing (Prentic–Hall Signal Processing series: Advanced monography).
- <sup>9</sup> Shi–Chang Wooh, Coach Wei. A Homomorphic Deconvolution Technique For Improved Ultrasonic Imaging Of Thin Composite Laminates. – Rev. of Progressive Quantative Nondestructive Testing, eds., D.O.Tompson & D.E.Chimenti, v. 17, Plenum Press, New York, 1998, p. 807–814.
- <sup>10</sup> Certo M Three-dimensional defect imaging by multyfrequency acoustical holography. – Mater. Evaluation, 1983, 41, № 7, p. 946–950.
- <sup>11</sup> Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986, с. 304.
- <sup>12</sup> А.П. Евтютов, А.Е. Колесников и др. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982, с. 344.