

УДК 681.883.03

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ГБО ЗА СЧЕТ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ

© А.И. Гончар, С.И. Донченко, Л.В. Нестеренко, Л.И. Шлычек, А.И. Шундель, 2006

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

У статті розглянуто основні принципи синтезу апертури. Надано дані натурних випробувань на Чорному морі, отримані в 2006 р. за допомогою ГБО-100МП. Після згортки яскравіше проявились мало розмірні об'єкти.

В данной статье рассмотрены основные принципы синтеза апертуры. Представлены данные натурных испытаний в Чёрном море, проведённые в 2006 году с помощью ГБО-100МП. После свёртки более ярко проявились малоразмерные объекты (либо детали донного рельефа).

In this article the main principles of aperture synthesis are considered. Data of environmental tests in Black sea performed in 2006 using side scan sonar 100MP is presented. After convolution the small objects have been revealed better (or bottom relief details).

Успешное решение ряда важных стратегических, навигационно-гидрографических и народнохозяйственных задач зависит от наличия достоверной информации о рельефе дна и лежащих на нем объектах.

В связи с этим в исследованиях Мирового океана все большее место занимает изучение рельефа дна, причем не только континентального шельфа, но и дна морей и океанов на больших глубинах [1, 2].

Одним из наиболее эффективных средств площадного обследования дна больших акваторий являются гидролокаторы бокового обзора (ГБО), обладающие высокой производительностью (величина обследуемой площади в единицу времени) и разрешающей способностью, позволяющие получать гидролокационное изображение дна, подобное фотографическому, с различной степенью детальности.

Гидролокационное изображение дна, полученное с помощью ГБО, позволяет увидеть и оценить особенности рельефа различной пространственной протяженности: большие подводные каньоны, хребты, локальные выходы коренных пород, отдельные обломки и микрорельефы донных осадков, заполняющих коренные породы.

Совмещение полученных синхронно записей ГБО и гидроакустического профилографа позволяет судить о распределении форм рельефа на обследуемой площади, а также выявить геологические причины их возникновения. Эти данные используются при поиске нефти и газа, а также твердых полезных ископаемых.

ГБО являются также незаменимым средством при выполнении поисковых и спасательных работ.

Вместе с тем, они обладают одним существенным недостатком – их разрешающая способность по дальности и азимуту (направлению) неодинакова, так что гидролокационное изображение объектов оказывается искаженным [1, 2].

Для получения же достоверной информации о рельефе дна и лежащих на нем объектах ГБО должен обладать одинаковой и достаточно высокой разрешающей способностью как по дальности, так и по направлению.

Разрешающая способность по дальности определяется длительностью зондирующего импульса τ и углом наблюдения φ (углом скольжения акустического луча)

$$\Delta R_{\text{д}} = \frac{c\tau}{2 \cos \varphi},$$

функция $\cos \varphi$ — нелинейная, в связи с чем $\Delta R_{\text{д}}$ по диапазону развёртки нелинейная.

Но с помощью математических преобразований может быть приведена к линейной (путём домножения на $\cos \varphi$ (а $\varphi = f(t)$)).

Минимальное τ определяется полосой пропускания приёмного тракта Δf

$$\tau = \frac{1,37}{\Delta f}.$$

Ограничения на Δf накладывает антенна, у которой Δf без специальных мер к расширению (а при этом ухудшается чувствительность) составляет 6 – 10 % от $f_{\text{раб}}$, т.е. максимально достижимая разрешающая способность по дальности зависит от частоты.

Разрешающая способность по направлению определяется дистанцией и шириной характеристики направленности (ХН) антенны в горизонтальной плоскости θ и равна $\Delta R_{\text{н}} = R\theta$. Ширина ХН определяется линейными размерами l и рабочей частотой f и определяется из соотношения

$$lf = \frac{2c}{1,425\pi \sin \frac{\theta}{2}}$$

$$\frac{\theta}{2} = \arcsin \frac{2c}{1,425\pi lf}$$

В связи с этим, исследования технических путей достижения высокой разрешающей способности не только по дальности, но и по направлению, и создания ГБО с одинаково высокой разрешающей способностью по дальности и направлению в целях получения подробного гидролокационного изображения рельефа дна океанов и морей с высокой производительностью для поиска и обнаружения донных технических объектов, в том числе затонувших судов, подводных лодок и подводных аппаратов, обеспечения навигационной безопасности судоходства, изучения геологического строения дна и поиска полезных ископаемых, чрезвычайно актуальны. Одним из способов увеличения разрешающей способности по направлению является синтез апертуры (свёртка по направлению) [1, 2].

Процесс синтезирования апертуры поясняется рис. 1. Носитель движется вдоль оси Y со скоростью V , диаграмма направленности (ДН) имеет в плоскости YZ ширину θ на уровне 3 дБ. При обработке сигнала бокового обзора имеем в пределах ДН элемент разрешения длиной:

$$L_k = R_k \theta, \quad (1)$$

где R_k – наклонная дальность до элемента Q_k ;

θ – ширина ДН на уровне 3 дБ.

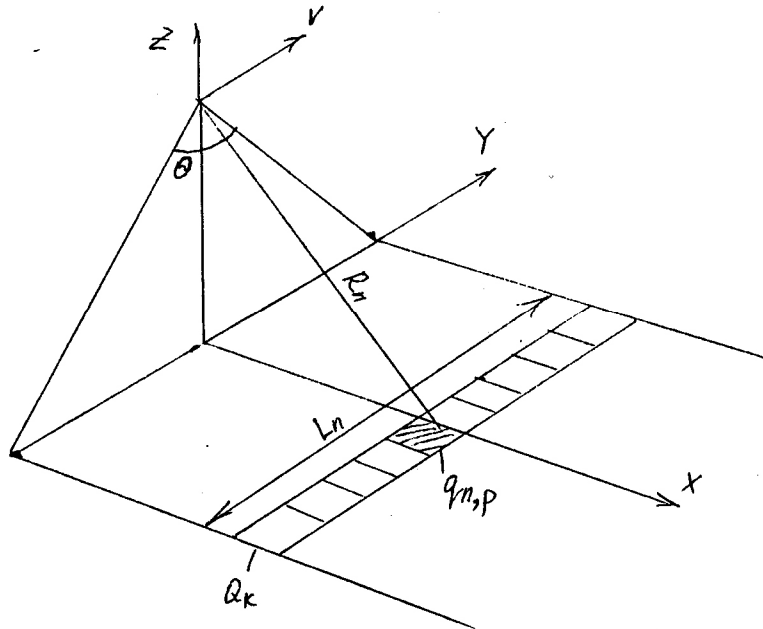


Рисунок 1.

Распределение (модуляция) фазы отраженного от элемента Q_k сигнала вдоль линии L_k определяется зависимостью [3]:

$$\varphi_k^s(t) = 2\pi v^2 t^2 / \lambda R_k, \quad -\frac{L_k}{2v} \leq t \leq +\frac{L_k}{2v}, \quad (2)$$

где λ – рабочая длина волны;

v – скорость движения носителя.

Введем дискретизацию по времени $t = pT_\zeta$ с шагом в период зондирования, при этом участок Q_k разобьется на $P_k = L_k / vT_\zeta$ элементов q, k, p , а выражение (2) примет вид:

$$\varphi^s(k, p) = 2\pi v^2 T_\zeta^2 \left(p - \frac{P_k}{2} \right)^2 / \lambda R_k, \quad 0 \leq p \leq P_k. \quad (3)$$

В общем случае отраженный от дна сигнал в каждом периоде зондирования для любой наклонной дальности R можно считать суммой элементарных сигналов, отраженных элементарными, подобными точечным целям, участками поверхности дна, лежащими в пределах раскрыва диаграммы направленности антенны и плоскости дна, соответствующей разрешающей способности по дальности

$$\dot{S}(R, pT_\zeta) = \sum_i S_i(pT_\zeta) = \sum_i U_i G(pT_\zeta - t_i) \cdot \exp\left\{-j\left[4\pi V_a^2 (pT_\zeta - t_i)^2 / (\lambda R_i) - \Psi_i\right]\right\}, \quad (4)$$

где R – наклонная дальность;

pT_ζ – период зондирования;

U_i – амплитуды отражённых сигналов;

$t_i = X_i / V_a$ – временной сдвиг;

$R_i = \sqrt{X_i^2 + h_0^2}$ – минимальное расстояние до отражателя;

h_0 – глубина под антенной;

$\Psi_i = 4\pi / \lambda R_i + \varphi_i$ – постоянная для данного отражателя неизвестная начальная фаза;

φ_i – фаза переотражения.

До поступления в цифровую систему обработки принятый сигнал, представляющий смесь отраженного сигнала и шума, дискретизируется по дальности и амплитуде с помощью АЦП [3].

По существу, дискретизация принятого сигнала как по координате, пройденного пути, так и по наклонной дальности R , является дискретизацией по времени с той лишь разницей, что дискретизация по направлению (пройденному пути) соответствует периоду зондирования и появляется в связи с импульсным характером работы ГБО, а дискретизация по наклонной дальности соответствует дискретизации по времени внутри периода зондирования с шагом $\Delta\tau = 1/f_R$ и возникает при преобразовании аналогового сигнала в цифровой.

Цифровой сигнал при этом становится функцией двух независимых дискретных аргументов и представляется своими действительной и мнимой составляющими

$$\dot{U}\{m, p\} = U^c\{m, p\} + jU^s\{m, p\}, \quad (5)$$

где $m=0,1,2,\dots,N_R-1$ – номер отсчета принятого сигнала по дальности;

$p=0,1,2,\dots,N$ – номер отсчета периодов зондирования.

Процесс получения двумерного изображения включает реализацию соотношений для каждого m -го отсчета по наклонной дальности

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{p=-N/2}^{N/2} \dot{U}\{m, p+q\} \dot{h}\{m, p\} \right|, \quad (6)$$

или

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{p=-N/2}^{N/2} \dot{U}\{m, q-p\} \dot{h}\{m, p\} \right|, \quad (7)$$

где $\dot{h}\{m, p\}$ – цифровая опорная функция

$$\dot{h}\{m, p\} = h^c\{m, p\} + j h^s\{m, p\} = \left\{ H\{pT_\zeta\} \exp \left[j2\pi (V_a p T_\zeta)^2 / (\lambda R_m) \right] \right\}, \quad (8)$$

соответствует наклонной дальности до каждой m -й полоски дальности

$$R_m = R_1 + m\Delta R, \quad (9)$$

$q=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – номер отсчета сигнала получаемого гидролокационного изображения по азимуту;

$H\{pT_\zeta\}$ – весовая функция, вид которой определяется при оптимизации системы обработки [1, 2].

Опорная функция $\dot{h}\{m, p\}$ симметрична относительно отсчета $N/2$, следовательно, можно записать

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{p=0}^{N-1} \dot{U}\{m, p+q\} \dot{h}\{m, p\} \right|, \quad (10)$$

или

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{p=0}^{N-1} \dot{U}\{m, q-p\} \dot{h}\{m, p\} \right|, \quad (11)$$

где

$$\dot{h}\{m, p\} = H\left[(p - N/2)T_\zeta \right] \exp \left[j2\pi (V_a^2 (p - N/2)^2 T_\zeta^2 / (\lambda R_m)) \right]. \quad (12)$$

Математическое выражение (10) описывает процесс цифрового синтезирования апертуры антенны для m -го отсчета по дальности принятого цифрового сигнала [1, 2].

Алгоритм синтезирования апертуры имеет вид:

$$E(k, m) = \left| \sum_{p=0}^{P_{k-1}} U^s e^{i\varphi^s(k, p)} \cdot S(k, m+p) \right|^2, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad m=0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где $U^s e^{i\varphi^s(k, p)}$ – опорная функция;

U^s – масштабный коэффициент;

$S(k, m)$ – принятый сигнал.

Он может быть выполнен в принципе несколькими способами (прямой свертки, быстрой свертки, гармонического анализа), алгоритмы обработки которыми существенно отличаются друг от друга, поэтому различными оказываются и структуры системы обработки, реализующие эти алгоритмы.

Структурные схемы таких устройств, используемых в радиолокации, подробно описаны в [3].

На рис. 2 - 7 представлен результат моделирования синтеза апертуры. При синтезировании апертуры приняты исходные данные: рабочая частота $f=100$ кГц, угол ДН $\theta=1,4^\circ$, средняя наклонная дальность $R=200$ м, скорость движения носителя $v=3$ м/с, период зондирования $T=0,266$ с. При этом ширина несинтезированной апертуры антенны $L=R\theta=4,88$ м, а синтезированной $vT=0,8$ м, т.е. ширина ХН уменьшилась примерно в 6 раз ($L/v \cdot T = R \cdot \theta / v \cdot T = 4,88 / 0,8 \approx 6$) и составляет $0,23^\circ$, а разрешающая способность $R\theta \approx 0,8$ м с синтезированной апертурой и $R\theta \approx 4,88$ м без синтеза. Разрешающая

способность по дальности равна $\frac{c\tau}{2} = \frac{1500 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,075$ м.

Количество реализаций, участвующих в свёртке, определяется выражением $P = R \cdot \theta / v \cdot T = 6$. Как видно из этого выражения, что уменьшение скорости движения антенны приводит к увеличению числа реализаций, участвующих в синтезе. Так для наших данных при $v=2$ м/с — $P=9$, а при $v=1$ м/с — $P=18$.

Рассмотрим случай для антенны с широкой диаграммой направленности $\theta=3^\circ$, для большой наклонной дальностью $R=2$ км и низкой частоты зондирования $f=12$ кГц. При этом период зондирования равен $T=2,68$ с, $R\theta=104,7$ м. В табл. 1 приведены все данные, касающиеся синтеза данной антенны.

Таблица 1.

v , м/с	vT , м	$R\theta/vT$	θ_c , град
3	8,00	13,10	0,23
2	5,33	19,64	0,15
1	2,67	39,21	0,08

Как видно из табл. 1, применение антенны с более широкой диаграммой направленности и на более больших диапазонах приводит к более значительному улучшению характеристик синтеза: увеличивается число реализаций участвующих в синтезе, значительно уменьшается ширина диаграммы направленности и, как следствие, улучшается разрешающая способность по направлению.

Рассмотрим отдельный пример выявления лежащих на дне затонувших, опасных в навигационном отношении, объектов отдельного участка дна Чёрного моря.

На рис. 2 представлена эхограмма, полученная в 2006 году ГБО-100 МП. На ней в верхней части виден один протяжённый объект искусственного происхождения.

Для улучшения гидролокационного изображения этого участка дна использована свертка по направлению (синтез апертуры), суть которой описана выше.

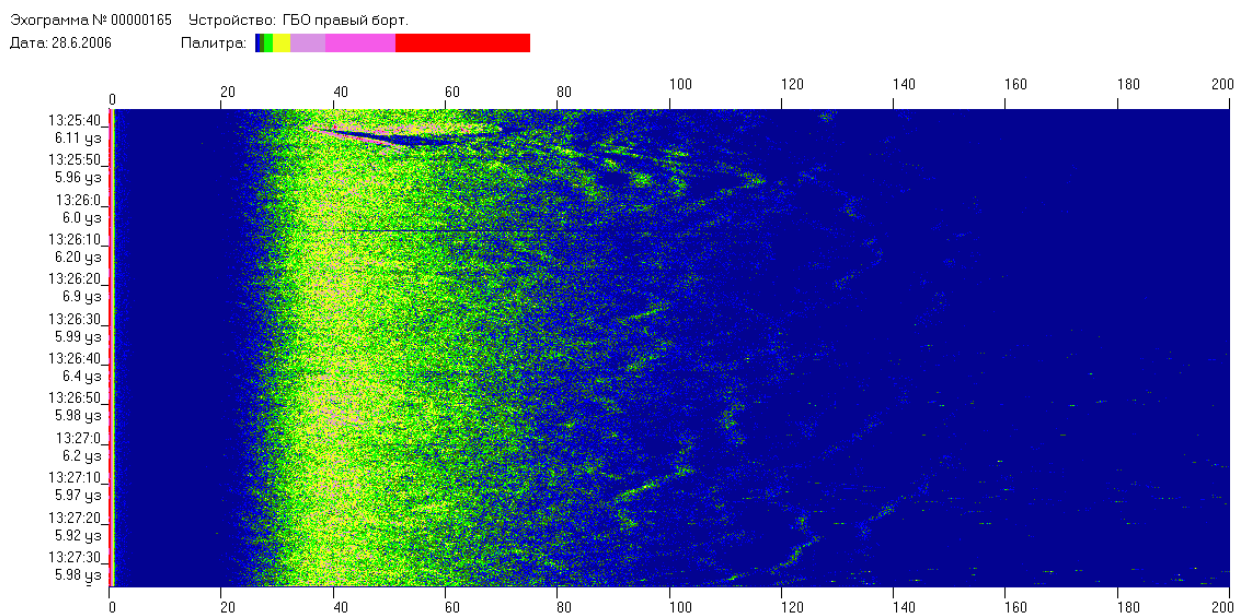


Рис. 2. – Исходная эхограмма

На рис.3 изображена эта же эхограмма, что и на рис. 2, но после свертки по направлению

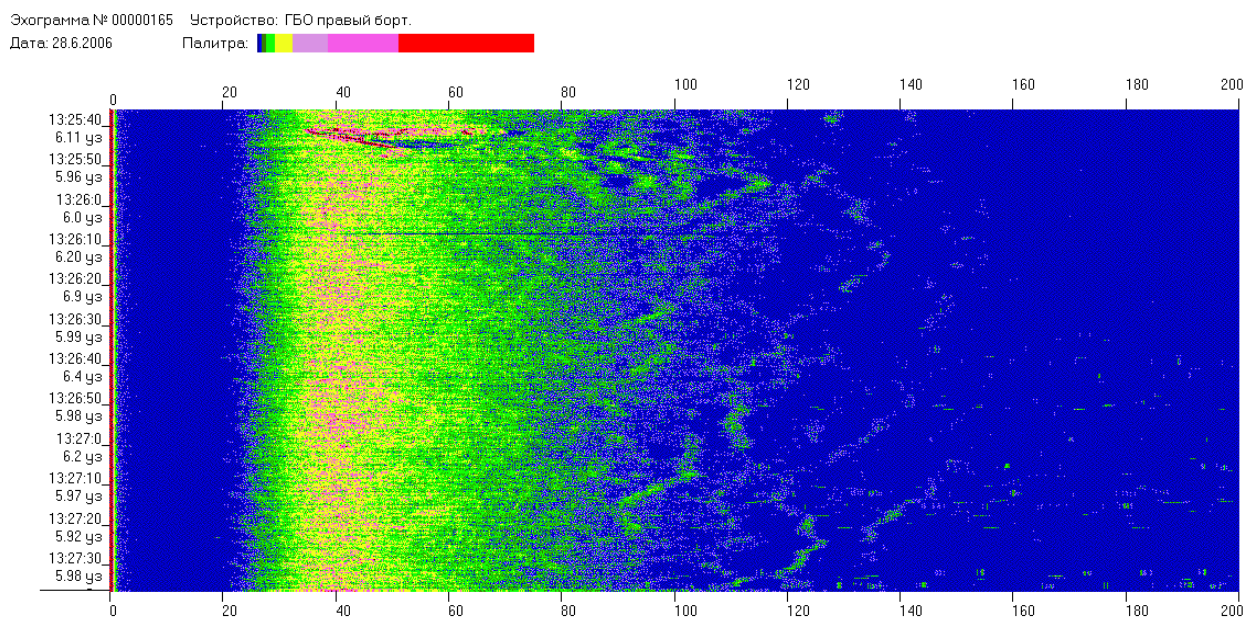


Рис. 3. – Эхограмма после свёртки по направлению

На эхограмме после свёртки (рис. 3) более ярко проявились слабовыраженные на исходной эхограмме (рис. 2) малоразмерные объекты (или детали донного рельефа)

На рис.4 представлено объёмное изображение сигнала от затонувшего объекта, находящегося в верхней части исходной эхограммы.

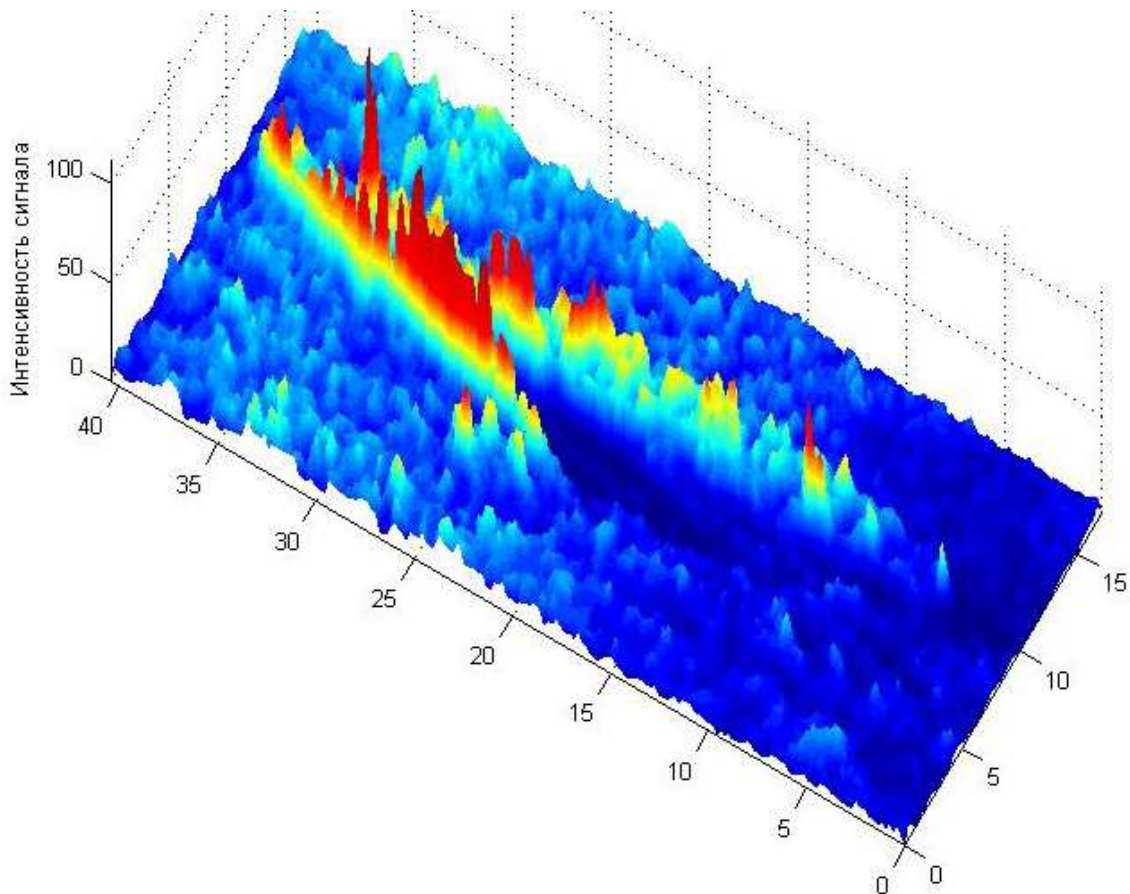


Рис. 4. – Об'ємне зображення сигналу від великого об'єкта

На рис. 5 представлено об'ємне зображення сигналів двох фрагментів слабо виражених об'єктів (або деталей донного рельєфу), проявившихся після свертки по напрямленню.

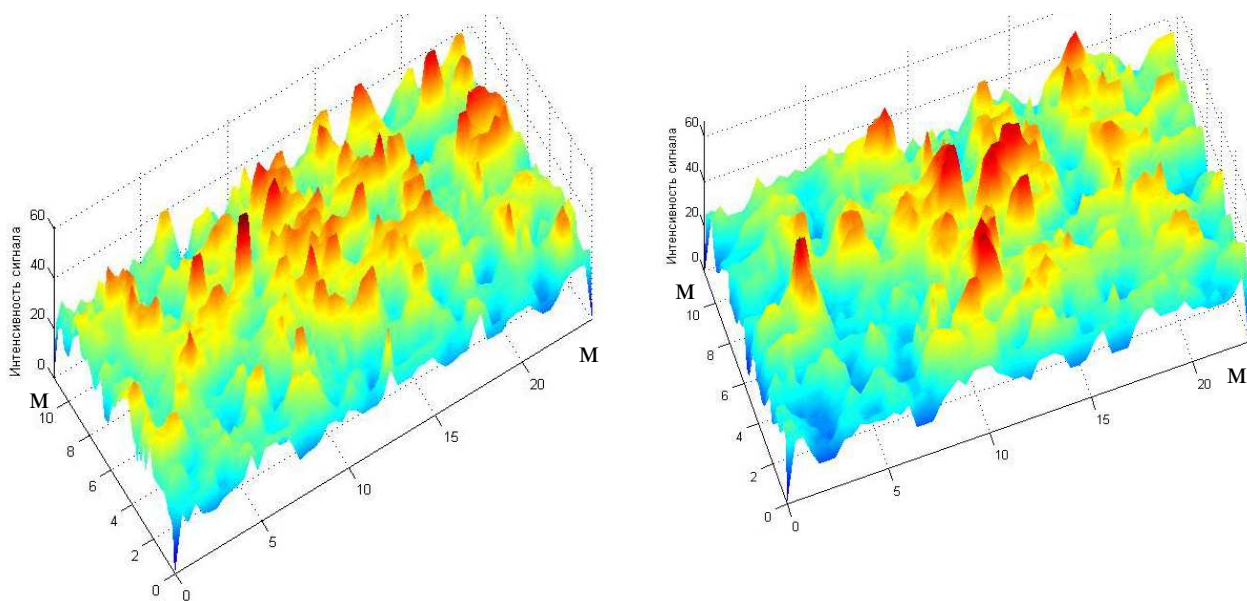


Рис. 5. - Об'ємне зображення сигналу від малорозмерних об'єктів (або деталей донного рельєфу)- два фрагменти

На рис. 6 и 7 - фрагмент исходной эхограммы и объемное изображение эхо-сигналов этого фрагмента.

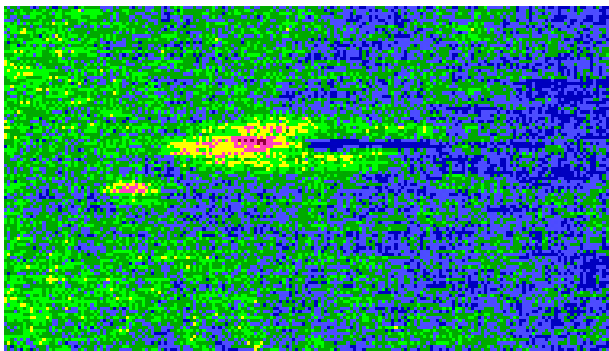


Рис. 6. – Фрагмент эхограммы

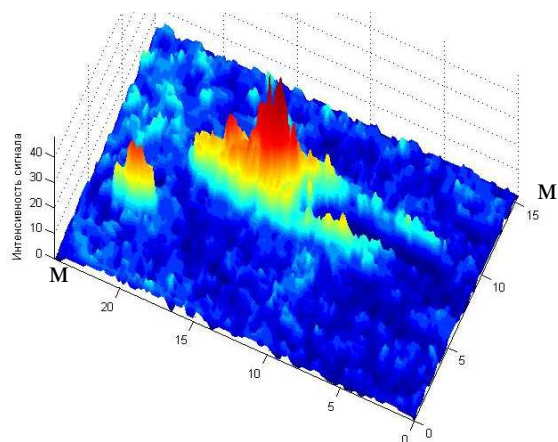


Рис. 7 – Объемное изображение сигнала

Как видно из приведенных выше примеров применение свёртки по направлению (синтеза апертуры) к исходной эхограмме увеличивает качество гидролокационного изображения последней: искусственные объекты принимают более яркую чёткую форму, слабовыраженные на исходной эхограмме малоразмерные объекты (или детали донного рельефа) проявляются более ярко. Использование математической среды MatLab даёт возможность представлять эхо-сигнал в 3D изображении.

Литература

1. Гидроакустические методы и средства исследования дна Мирового Океана / Гончар А.И., Шлычек Л.И., Голод О.С. и др. – Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 2002. - 222 с.
2. Гончар А.И. Проблема создания высокоэффективных многоцелевых гидролокаторов бокового обзора. – Запорожье: НТЦ ПАС ИППЭ НАН Украины, 1998. – 142 с.
3. Антипов В.Н., Горяинов В.Т. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – М.: Радио и связь, 1988.