

УДК 534.26

© 1992 г. А.В. Бунчук, В.И. Воловов, А.И. Говоров

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
АКУСТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДНА ОКЕАНА
С ПОМОЩЬЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Рассмотрены вопросы получения акустических изображений дна океана с использованием многоэлементных плоских приемных антенных решеток. Показана взаимосвязь между двумерным фурье-преобразованием и формированием диаграммы направленности антенны. Определены границы применимости метода и физический смысл получаемых акустических изображений. Рассмотрены факторы, влияющие на достоверность получаемых изображений, причины их возникновения и меры по их устранению. Приведены примеры акустических изображений дна океана, полученных в натуральных условиях как при одноразовом зондировании, так и при компоновке результатов последовательного зондирования более протяженных участков дна.

В последние годы при исследованиях дна океана, и в частности при дистанционном поиске железо-марганцевых конкреций, получил развитие метод формирования акустического изображения дна с помощью плоских пространственно разнесенных приемных антенн. Суть метода заключается в том, что излучатель звука, находящийся вблизи поверхности воды, с диаграммой направленности шириной θ_u , ориентированной вертикально вниз, озвучивает область дна размером $a \simeq H\theta_u$, где H — глубина места ($\theta \ll 1$). Акустическое поле, переизлучаемое озвученной областью, принимается многоэлементной плоской антенной размером L , помещаемой вблизи от излучателя. Зарегистрированные антенной значения p_a поля с помощью математических преобразований пересчитываются в значения p_g поля вблизи поверхности дна. "Восстановленные" таким образом значения p_g и называются акустическим или визуализированным изображением дна.

Возможны различные методы расчета поля p_g [1]. В работах [2, 3], в которых представлены первые экспериментальные образцы акустических изображений дна глубокого океана, в качестве такого метода используется двумерное преобразование Френеля и получение квадрата его модуля. Рассмотрим условия получения изображений дна с помощью этого метода, недостаточно проанализированные в указанных работах.

Известно [4], что при выполнении условий $H \gg L$, $H \gg \lambda$, где λ — длина излучаемой волны, при удалении H антенны от дна, удовлетворяющих неравенству

$$H^3 \gg ka^4, \tag{1}$$

соответствующему нахождению антенны в ближней зоне переизлученного поля, значения p_a можно представить в виде преобразования Френеля от значений p_g . Обращая это преобразование, связь между искомым полем p_g и измеренным полем p_a можно записать в виде

$$p_g(\mathbf{r}) = \frac{ik}{2\pi H} e^{-ikH} e^{-ikr^2/2H} \int_{-L/2}^{L/2} p_a(\mathbf{r}') e^{-ikr'^2/2H} e^{-ikr\mathbf{r}'/H} d^2\mathbf{r}', \tag{2}$$

где $k = 2\pi/\lambda$, \mathbf{r} и \mathbf{r}' — радиусы-векторы в плоскостях дна и антенны соответственно.

Если антенна удалена от дна на расстояние H , удовлетворяющее более сильному

неравенству

$$H \gg ka^2, \quad (3)$$

означающему, что антенна находится в дальней зоне переизлученного поля, выражение (2) упрощается, так как квадратичный по r фазовый множитель перед интегралом может быть спущен [4].

Нетрудно убедиться, что в реальной океанической ситуации, когда $H \gg 1000$ м, $\theta_a \approx 0,1$, $k \approx 40$ м⁻¹, $L \approx 2 \div 4$ м, $a > 100$ м, неравенства (1) и (3) не выполняются. Их, однако, можно ослабить, если принять во внимание физический смысл интеграла в выражении (2). Если величина H удовлетворяет неравенству $H \gg kL^2$, то квадратичный по r' фазовый множитель внутри интеграла не существен (ниже он будет опускаться), остающийся же интеграл Фурье можно интерпретировать как выходной сигнал антенны с диаграммой направленности вида $\sin x/x$ с шириной раскрыва $\theta_a \approx 1/kL$, скомпенсированной в направлении на точку r дна [5]. Таким образом, при каждом значении r с помощью выражения (2) акустическое изображение вычисляется не во всей озвученной области дна, а лишь в некоторой окрестности точки r размером $l \approx H\theta_a < a$. Очевидно, что для нахождения изображения только в этой окрестности выражение (2) останется в силе при замене неравенств (1) и (2) соответственно на $H^3 \gg kl^4$ и $H \gg kl^2$. Поскольку $l \sim 10$ м, из выполнения первого и невыполнения второго из этих требований следует формальная возможность использования выражения (2) для расчета акустических изображений дна глубокого океана при обязательном учете квадратичного фазового множителя перед интегралом. Подставив значение $l \approx H/kL$ в неравенство $H^3 \gg kl^4$, получим $H \ll k^3 L^4 \ll 10^6$ м. Последнее означает, что "восстановление" поля p_g с помощью (2) возможно лишь на ограниченных расстояниях от приемной антенны.

Реальный расчет по формуле (2) тем не менее невозможен из-за отсутствия точных данных о глубине места. Ошибки в значении H наиболее сильно сказываются при расчете фазы акустического изображения, и особые трудности связаны с оценкой квадратичного фазового множителя перед интегралом (2). В то же время точность оценки интенсивности (квадрата модуля амплитуды) поля $p(r)$, даваемого формулой

$$I_g(r) = \left(\frac{k}{2\pi H} \right)^2 \left| \int_{-L/2}^{L/2} p_a(r') e^{-ikrr'/H} d^2 r' \right|^2, \quad (4)$$

определяется ошибками значения подынтегрального множителя $\exp(ikrr'/H)$. Если ΔH — неточность значения глубины, то связанная с ней ошибка расчета этого множителя мала при условии $LQ_u \Delta H/H \ll \lambda$, которое выполняется уже при $\Delta H/H \leq 0,1$.

Таким образом, на практике можно оценивать лишь величину $I_g(r)$. Именно так были проведены расчеты в работах [2, 3, 6, 7], и ниже под акустическим изображением также понимается результат расчета величины $I_g(r)$.

Отметим, что квадрат модуля интеграла в правой части выражения (4) с точностью до постоянных множителей, является интенсивностью $I_p(r)$ поля, пришедшего по основному лепестку диаграммы направленности приемной антенны, скомпенсированной в направлении на точку r . Совокупность значений $I_p(r)$ при различных r , лежащих в пределах озвученной области дна, есть пространственно-угловой энергетический спектр переизлученного поля. В свою очередь, независимо от физической природы донных рассеивателей звука, при выполнении условия $H^2 \gg k\rho^3$, где ρ — радиус корреляции рассеивателей, величина $I_p(r)$ пропорциональна интегралу $\int m(r) dS$ от коэффициента обратного рассеяния $m(r)$, взятого в пределах окрестности l точки r ($S \sim l^2$) [4]. Указанное условие в силу $\rho \ll l$ на практике выполняется всегда, интеграл же можно приближенно заменить на значение $m(r)l^2$. В частном случае рассеяния звука неровностями донного рельефа кирхгофовского типа с большими параметрами Релея $P \gg 1$ условие $I_p \sim m(r)$ еще более облегчается: $H^2 \gg k\rho^3/P$ [8]. Таким образом, акустическое изображение дна (4) можно рассматривать и как пространственно-угловое распределение значений коэффициента обратного рассеяния звука дном.

Рис. 1. Изображение дна океана, осредненно-го по 10 реализациям

Рис. 2. Фрагмент изображения дна океана, полученный при компоновке результатов последовательного зондирования

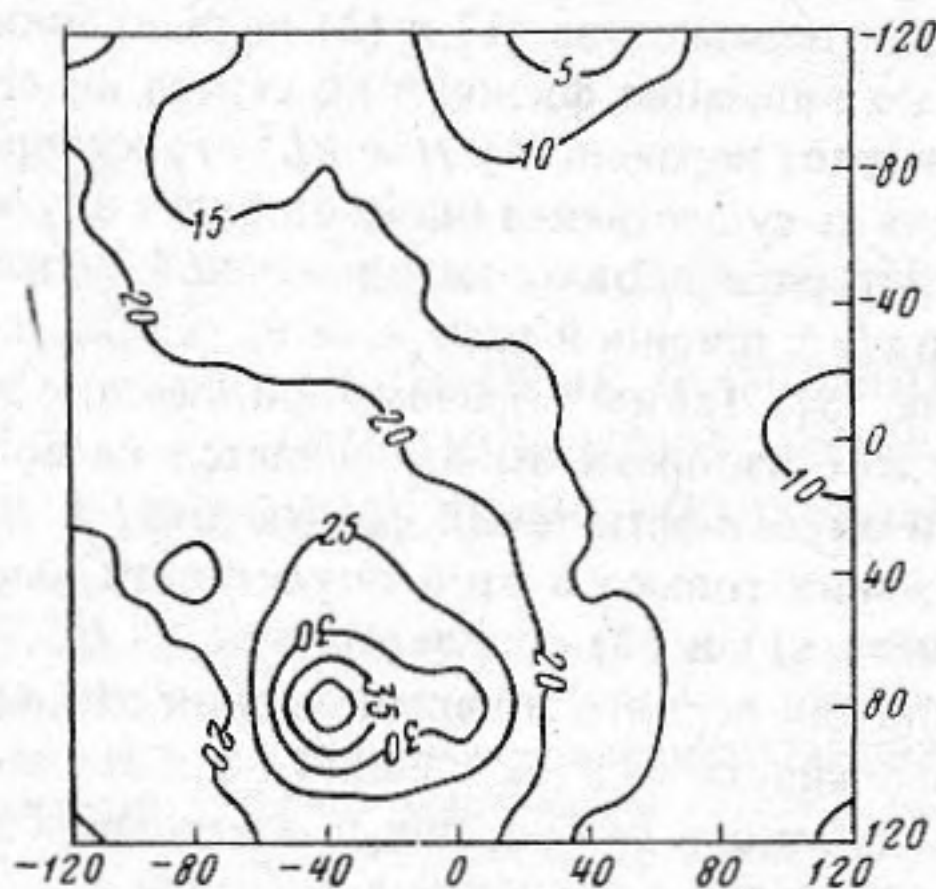


Рис. 1

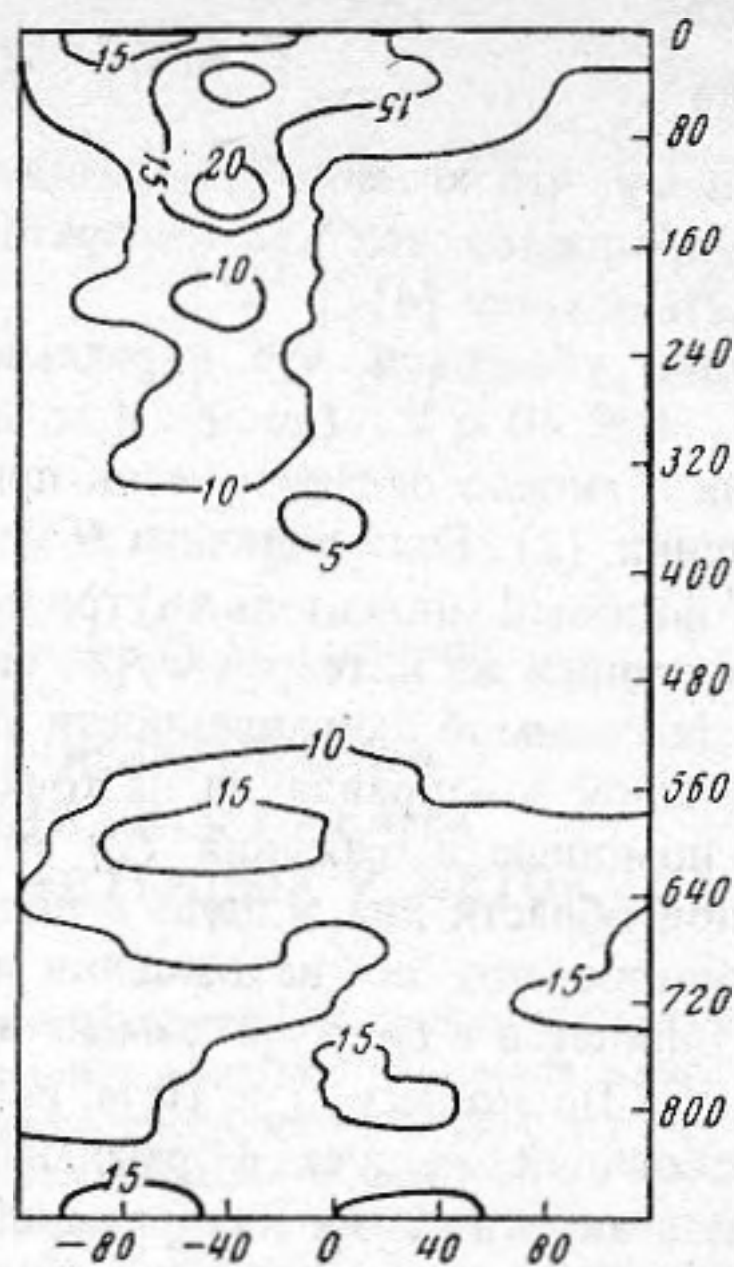


Рис. 2

Перейдем теперь к практическим вопросам получения акустических изображений дна. В силу случайного характера донных рассеивателей звука поле p_a , регистрируемое приемной антенной, и, следовательно, акустическое изображение I_g также случайно. Степень его устойчивости к малым смещениям Δ излучателя и приемной антенны относительно дна зависит, очевидно, от соотношения радиуса ρ_a корреляции поля p_a и размера L приемной антенны. Обычно $\rho_a \approx \lambda$ [9], т.е. $\rho_a/L \ll 1$, и, следовательно, изображение дна, получаемое уже при однократной процедуре нахождения I_g , можно считать оценкой истинной величины \bar{I}_g . Для повышения ее устойчивости можно использовать усреднение по ансамблю значений I_g , получаемых при горизонтальных смещениях $\rho_a \ll \Delta \ll l$. Практически речь идет о смещениях на несколько L .

Кроме того, следует учесть, что число чувствительных элементов приемной антенны конечно. Для дискретной приемной решетки с числом элементов по осям N и шагом d выражение (4) преобразуется к виду (множитель перед интегралом опущен)

$$I(x, y, z) = \left| \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} p(n, m) \exp \left[-\frac{ikd}{H} (xn + ym) \right] \right|^2, \quad (5)$$

где $\mathbf{r} = \{x, y\}$; $p(n, m)$ — комплексная амплитуда сигнала на элементах антенны в точках с координатами nd, md . Ввиду малости зоны, участвующей в формировании отраженного сигнала, имеем

$$x/H = \operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha; \quad y/H = \operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta, \quad (6)$$

где α, β — углы, образованные проекциями направления на точку дна с осями координат.

Если на стороне антенны укладывается целое число волн сигнала, то выражение

$$I(\alpha_s, \beta_t) = \left| \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} p(n, m) \exp \left[i 2 \pi \left(n \frac{s}{N} + m \frac{t}{N} \right) \right] \right|^2 \quad (7)$$

определяет интенсивность сигнала, пришедшего с фиксированного направления, характеризуемого углами $\alpha_s = \arcsin(n \lambda/L)$ и $\beta_t = \arcsin(m \lambda/L)$, где s и t — целые числа в диапазоне от 0 до $\pm N/2$. Связь углов с координатами точек дается выражениями $x = H \operatorname{tg} \alpha_s$ и $y = H \operatorname{tg} \beta_t$.

Ограниченность габаритов антенны приводит к образованию в диаграмме направленности боковых лепестков, уровень которых определяется функцией вида $\sin Nx/N \sin x$. Уровень боковых лепестков можно уменьшить введением специальных распределений чувствительности приемников по поверхности антенны, что, однако, приводит к некоторому расширению основного лепестка диаграммы направленности [10]. Если $\lambda > 2d$, в диаграмме направленности возникают максимумы, равные основному, устранить которые не представляется возможным. Однозначные результаты могут быть получены, если размеры участка дна, формирующего отраженный сигнал, не превосходят величины $\lambda H/d$ [2], что на практике достигается выбором излучателя с соответствующей диаграммой направленности.

На рис. 1 в виде изолиний интенсивности с шагом 5 относительных единиц представлено изображение дна, полученное в прибрежном районе океана с помощью специальной системы [11] при глубине места около 800 м. Частота излучения составляла 10 кГц, период 1,5 с, скорость дрейфа судна 1,5–2,0 узла. Элементы разрешения в этих условиях по углу и расстоянию составляли 3° и около 40 м соответственно. Изображение на рис. 1 получено при осреднении 10 последовательных изображений.

Общей чертой полученных изображений является наличие в их центральной части резкого максимума интенсивности переизлученного звука вблизи углов нормального падения (на рис. 1 она смещена от центра, что связано со статическим отклонением плоскости антенны от горизонтали примерно на 6°). Эта область на изображениях является наиболее наглядным представлением так называемой эффективной отражающей области дна, существование и характеристики которой были определены ранее на основании косвенных признаков (увеличение длительности отраженных импульсов и ширины спектра флуктуаций отраженных сигналов и др.) [9]. На рис. 1 область максимума составляет по уровню 0,7 примерно 2° , а ее линейный размер – около 40 м. Как известно, эффективная отражающая область вносит основной вклад в энергетические характеристики отражения, доля периферии относительно мала. Однако этот, иногда называемый "зеркальным бликом", сигнал нельзя рассматривать как когерентную часть суммарного сигнала, что следует уже из того, что размер этой области существенно превышает первую зону Френеля.

Для практических приложений таких, как поиск ЖМК, "зеркальный блик" является негативным фактором, неоправданно расширяющим динамический диапазон интенсивности изображения. Естественным методом борьбы с ним является коррекция изображения, предусматривающая компенсацию угловой зависимости коэффициента рассеяния звука дном на основании осредненных данных для данного района. Тем не менее полностью избежать отмеченного эффекта не удастся, поэтому при построении изображений протяженных областей дна, получаемых в процессе движений судна путем последовательного объединения перекрывающихся осредненных изображений отдельных участков, центральная часть исключалась из каждого. По результатам экспериментальной съемки в упомянутом районе таким образом было построено изображение участка дна шириной 240 м и протяженностью более 4000 м, фрагмент которого представлен на рис. 2. Обозначение изолиний дано в относительных единицах аналогично рис. 1. Для наглядности изображение построено в различных масштабах по осям. Можно видеть, что по сравнению с исходными изображениями динамический диапазон интенсивности существенно снижается. Признаками достоверности и надежности получаемой информации являются сохранение особенностей изображений соседних участков дна и плавный переход с одного изображения на другое (разрывы изолиний при компоновке суммарного изображения практически отсутствуют).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китинг П.Н., Саватори Т., Жилинскас Г. Обработка сигналов при формировании акустических изображений // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 4. С. 61–77.
2. Бреховских Л.М., Краснобородько В.В., Кириаков В.Х., Селиванов В.Г. Получение акустического изображения морского дна с помощью многоэлементных антенн // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 1000–1003.

3. Бреховских Л.М., Краснобородько В.В., Кириаков В.Х. Акустические исследования дна океана с применением антенных решеток // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 137–146.
4. Рытов С.М., Кравцов С.М., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику: Ч. 2. М.: Наука, 1978. 464 с.
5. Зверев В.А. Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике). М.: Сов. радио, 1975. С. 136–141.
6. Богданов А.Н., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П. Синхронное определение характеристик донного рельефа и рассеяния звука с помощью акустических многоэлементных антенн // Акуст. журн. 1991. Т. 37. Вып. 2. С. 246–250.
7. Богданов А.Н., Краснобородько В.В. Получение объемного изображения дна океана с помощью многоэлементной плоской антенны // Океанология. 1991. Т. 31. Вып. 1. С. 170–174.
8. Лысанов Ю.П. Рассеяние звука неровными поверхностями // Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 231–330.
9. Воловов В.И., Житковский Ю.Ю. Отражение и рассеяние звука дном океана // Акустика океана / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 395–490.
10. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 280 с.
11. Антокольский Л.М., Воловов В.И., Говоров А.И., Халилуллоев Ш.Ш. Многоэлементная приемная антенна для исследования отражения звука от дна океана // Судостроительная промышленность. Сер. Акустика. 1988. Вып. 3. С. 27–32.

Акустический институт
им. Н.Н. Андреева
Российской Академии наук

Поступила в редакцию
10.10.91

A.V. Bunchuk, V.I. Volovov and A.I. Govorov

SOME SPECIAL FEATURES OF RECONSTRUCTION OF ACOUSTIC IMAGE OF OCEAN FLOOR BY MULTIELEMENT ARRAY

The problems of reconstruction of acoustic images of ocean floor by the two-dimensional spatial Fourier transform are discussed. It is shown that the acoustic image which is determined as the transformation of a field measured by the array into the field near the floor can't be evaluated correctly. Actually, it is possible to find out only the intensity of the field near the floor. In this case the acoustic image can be considered also as the distribution of the effective coefficient of the floor back scattering.

Factors affecting the acoustic image are discussed and methods for the image correction are introduced.

The examples of the acoustic images obtained in situ both at single floor sounding and by the connection of results of consequent sounding measurements of the extended areas of the floor are given.

A complete list of Soviet papers devoted to this problem is reviewed.