

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № 305

УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАССЕЯННЫХ ДНОМ
ТОНАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
В ГЛУБОКОВОДНОМ ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

И.Б.Бурлаков
Ю.В.Петухов
М.М.Славинский

Горький 1990

Бурлякова И.Б., Петухов Ю.В., Славинский М.М.

УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАССЕЯННЫХ ДНОМ ТОНАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ГЛУБЬКОВОДНОМ ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ/Препринт № 305, Горький: НИРФИ, 1990. — 11с.

УДК 534.231.1

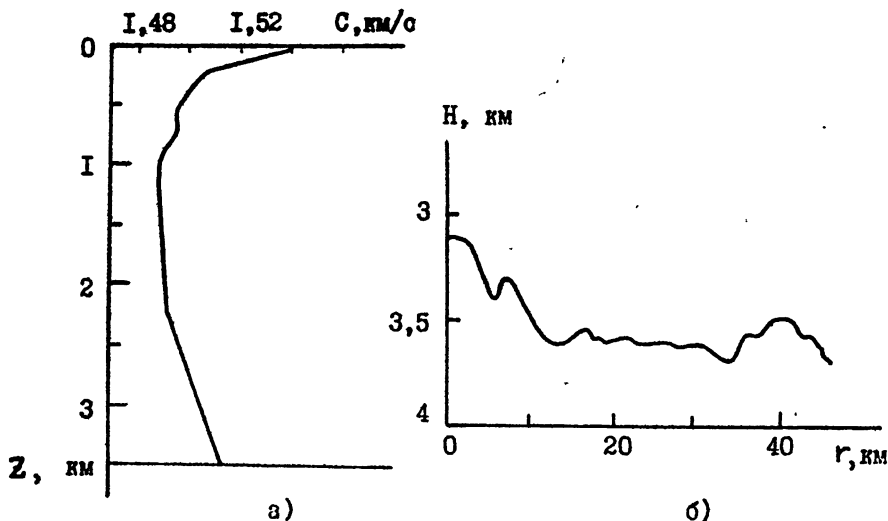
Показано, что в определенной области расстояний угловая зависимость рассеянного дном акустического поля имеет асимметричный вид, объясняющийся влиянием стратификации скорости звука на распространение волн в водном слое. Обнаружено, что в спектре рассеянного сигнала наряду с абсолютным максимумом, соответствующим первому донному отражению, присутствует расположенный на противоположном по знаку доплеровском смещении частоты относительный максимум, отвечающий сигналу, рассеянному в обратном направлении и испытывавшему при распространении к приемнику дополнительное отражение от дна.

Ранее в /1/ было показано, что с использованием метода доплеровской томографии, сочетающего синтезирование апертуры с доплеровскими эффектами для анализа акустического поля, возбуждаемого равномерно движущимся стабильным тональным источником, в глубоководных океанических волноводах удается разделить пространственные зависимости доплеровских смещений частоты, соответствующие сигналам различной кратности отражения от дна, реверберации и - распространяющимся вдоль "чисто" водных лучей. В /1/ отмечалось также, что пространственные зависимости спектральной плотности мощности сигналов, полученные интегрированием в достаточно узких диапазонах по частоте и расстоянию вдоль соответствующих линий на плоскости доплеровское смещение частоты - дистанция, могут быть использованы для определения отражающих и рассеивающих свойств подводного грунта. В /2/ с использованием предложенного в /1/ метода были найдены на различных частотах угловые зависимости коэффициентов отражения акустических сигналов от относительно ровного дна глубоководного океанического волновода и, тем самым, определены эффективные значения плотности и скорости звука в осадках.

В настоящем же сообщении продемонстрированы возможности метода доплеровской томографии при исследовании закономерностей в поведении угловой зависимости рассеянных неровным дном акустических сигналов с ростом расстояния между корреспондирующими точками.

Экспериментальные исследования проводились в глубоководном районе Мирового океана (см. рис.1) с аналогичной /2/ зависимостью скорости звука $c(z)$ от глубины z , однако, в отличие от /2/, дно океана, как и в /1/, было существенно неровным (см. рис.1). Гармонический источник акустических сигналов с частотой излучения $f_0 = 146$ Гц буксировался на глубине $Z_s \approx 75$ м со скоростью $v \approx 3,5 \div 4$ м/с; прием сигналов осуществлялся на одиночный ненаправленный гидрофон, располагавшийся на глубине $Z_r \approx 10^2$ м. При получении необходимых для дальнейшего анализа зависимостей от гори-

горизонтального расстояния доплеровских смещений частоты $\Delta f(r) = f(r) - f_0$ принимаемый во времени t сигнал давления $P(t)$, записанный параллельно с опорным, гетеродинировался на промежуточную частоту $f = f_{\text{п}} = 1 \text{ Гц}$ и фильтровался в полосе $\Delta f_{\text{ф}} = 2 \text{ Гц}$.



Р и с. 1

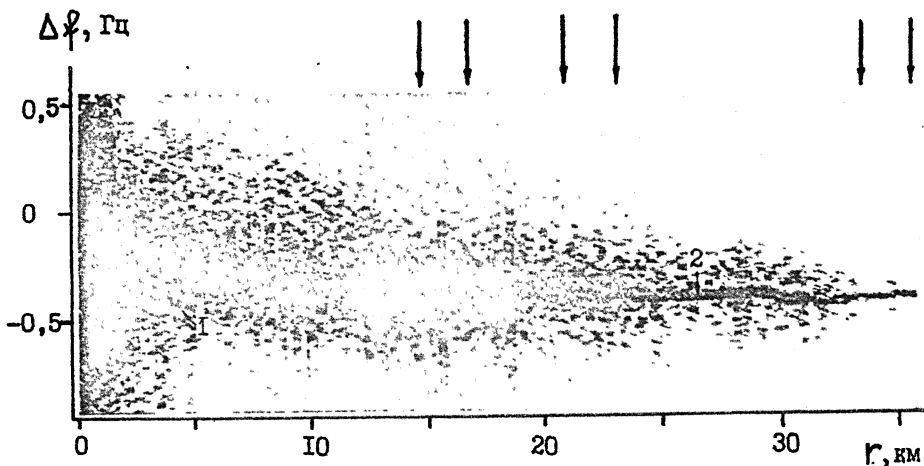
Стратификация скорости звука $C(z)$ по глубине z - (а) и изменения с расстоянием r глубины $H(r)$ водного слоя - (б) в районе проведения экспериментальных исследований.

Текущий спектральный анализ

$$S(\nu, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_{\varphi}(t') e^{2\pi i \nu t'} dt',$$

здесь ν - частота, представленного таким образом сигнала давления $P_{\varphi}(t)$, вводимого в ЭВМ с частотой дискретизации $\nu_{\text{д}} = 5 \text{ Гц}$, проводился без весовой обработки при длительности каждой реализации $T = 10^2 \text{ с}$ с шагом во времени $\Delta T = 25 \text{ с}$ ($t = l \Delta T$, $l = 0, 1, 2, \dots$). Результаты спектрального анализа $W = |S(\nu, t)|^2$ представлены на рис.2 в плотностной записи на плоскости доплеровское смещение частоты - расстояние ($\Delta f - r$), т.к. $t = t(r)$, где заметно проявляются две линии $\Delta f(r)$, отвечающие "чисто" водным сигналам $\Delta f_w(r)$ и когерентной компоненте (зеркальное

отражение) сигналов первого донного отражения $\Delta f_g(r)$, хорошо просматривающейся на фоне рассеянных составляющих $\Delta f_r(r)$, расположенных по обе стороны от нее. Из-за значительной изрезанности два аналогичная $\Delta f_g(r)$ линия, соответствующая сигналам второго донного отражения едва просматриваются в области расстояний $r \geq 10$ км, располагаясь чуть выше $\Delta f_g(r)$; поэтому можно ожидать, что рассеянное поле обусловлено в основном сигналами, однократно отраженными от дна океана.



Р и с. 2

Результаты текущего спектрального анализа $W(\Delta f, r)$, представленные на плоскости доплеровское смещение частоты - расстояние ($\Delta f - r$). Линия 1 соответствует водным сигналам, 2 - когерентным компонентам сигналов первого донного отражения с расположенными по обе стороны от нее составляющими, отвечающими рассеянными сигналами. Вертикальными стрелками отмечены области по r , использованные для получения усредненных значений $W(\Delta f, r)$, приведенных на рис. 5

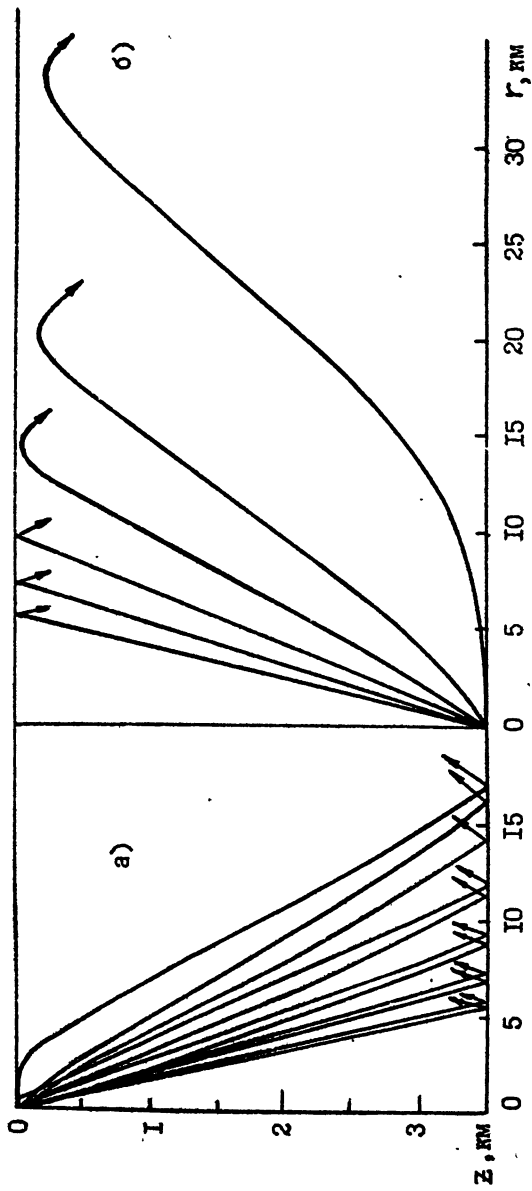
Из приведенных на рис.2 данных обращает на себя внимание существенная асимметрия в расположении составляющих $\Delta f_r(r)$ относительно $\Delta f_g(r)$, диапазон значений которых заметно расширен в область $\Delta f_g(r) < \Delta f(r) < |\Delta f_g(r)|$ до расстояний $r \approx 18 + 20$ км. Для объяснения обнаруженного эффекта

асимметрии в поведении доплеровграмм, рассеянных дном сигналов $\Delta f_r(r)$, воспользуемся простыми представлениями лучевой теории, согласно которой имеем

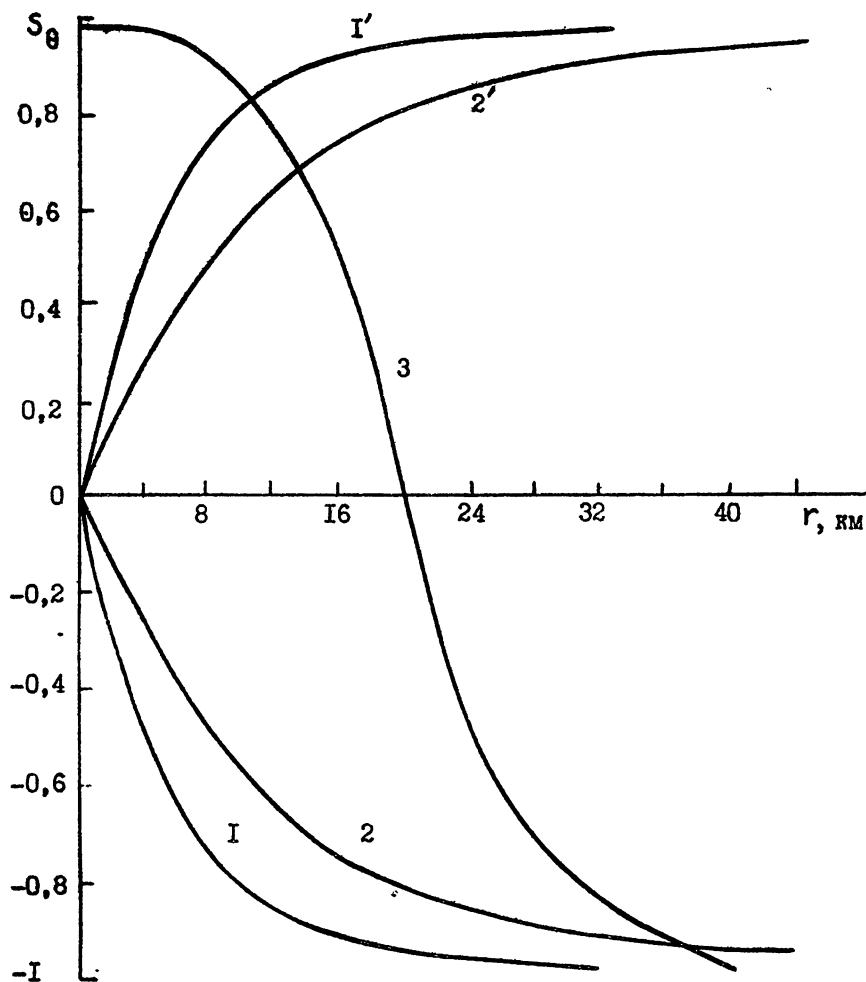
$$\Delta f_r = -f_0 \frac{v}{c(z)} \sin \theta, \text{ где } \theta = \arcsin \frac{c(H) \sin \theta_0}{c(z_s)} -$$

угол падения сигналов на дно, зависящий от профиля скорости звука $c(z)$, глубины водного слоя H и угла выхода θ_0 , положительного при направлении соответствующих лучей в заднюю и отрицательного - в переднюю по отношению к направлению движения излучателя полусферы. При заданных $c(z)$, $H \approx 3,5$ км (см. рис. 1) и z_s, z_r область дна, озвучиваемая сигналами, распространяющимися по "чисто" водным лучам, составляет $0 = r = D(z_s, z_r)/2 \approx 16$ км, т.е. половину максимальной длины цикла луча $D(z_s, z_r)$ (см. рис. 3). Рассеянные сигналы, распространяясь по "чисто" водным лучам с углами выхода $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{2}$ из вторичных источников, расположенных на высотах $h = 2 + 200$ м над средним уровнем дна $H = 3,5$ км, непосредственно достигают приемника до расстояний $r = D(H-h, z_r)/2 = 20 + 18$ км (см. рис. 3). Поэтому в области $0 \leq r \leq D(H-h, z_r)$ диапазон $-\frac{v}{c(z)} f_0 \leq \Delta f_r < \Delta f_b(r)$ сужается с ростом r и при $r = D(H-h, z_r)/2$ его ширина составляет всего лишь 10% от первоначальной величины при $r = 0$ (см. рис. 4); диапазон же $\Delta f_b(r) < \Delta f_r \leq 0$, естественно, расширяется в области расстояний $0 \leq r \leq D(H-h, z_r)/2$. Если теперь учесть существование диапазона положительных значений $0 \leq \Delta f_r \leq \frac{v}{c(z)} f_0 \sin \theta_0(r)$ при $0 \leq r \leq D(H-h, z_r)/2$, где $\theta_0(r)$ - зависящий от расстояния граничный угол падения сигналов на дно, то, как следует из результатов расчета (см. рис. 4), асимметрия в расположении значений $\Delta f_r(r)$ по обе стороны от когерентной составляющей $\Delta f_b(r)$ должна быть заметнее выражена в области расстояний $4 \text{ км} \approx [D(H-h, z_r) - D(z_s, z_r)]/2 \leq r \leq D(H-h, z_r)/2 \approx 20$ км что согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 2).

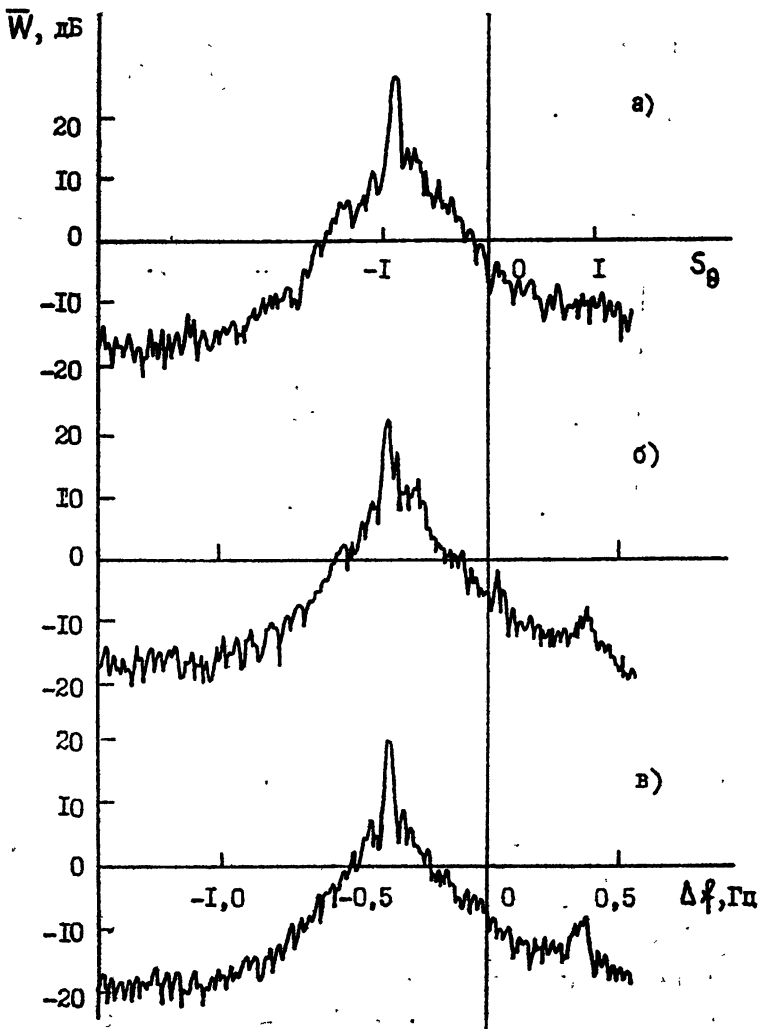
Для получения угловой зависимости рассеянных дном сигналов достаточно лишь при определенных значениях r сделать спектральные "разрезы" на плоскости $\Delta f - r$ (см. рис. 2), причем с целью исключения возможных неинформативных флуктуаций в результатах спектрального анализа удобно выполнить усреднение $\bar{W}(\Delta f, r) = R^{-1} \times \int_r^{r+R} W(\Delta f, r) dr$ по определенной области расстояний R . Как следует из приведенных на рис. 5 результатов, асимметрия в спектрах



Р и с. 3 Траектории лучей, вышедших из источников, расположенных на глубине $z_s = 75$ м - (а) и высоте $h = 2$ м над средним уровнем дна $H = 3,5$ км - (б). Углы скольжения лучей при выходе из соответствующих источников составили $\chi = \pm 60^\circ$, $n = [0, 5]$



Р. И. О. 4 Теоретические зависимости от расстояния r величины $S_\theta = \Delta f(r) C(H) / f_0 v = \sin \theta$ характеризующей угол падения θ сигналов на дно. Кривые 1, 2 соответствуют когерентным компонентам сигналов первого и второго донных отражений, 1', 2' - составляющим аналогичных сигналов, рассеянных в обратном направлении; 3 - ограничивает область (слева) наблюдения рассеянных сигналов, образованных при первом донном отражении и распространяющихся к приемнику по "чисто" водным лучам без дополнительных отражений от дна



Р и с. 5 Усредненные по расстоянию r экспериментальные зависимости от доплеровского смещения частоты Δf и величины $S_\theta = \sin^2 \theta$ (θ — угол падения) спектральной плотности мощности $W(\Delta f, r)$ рассеянного дном акустического поля при $r = 15$ км — (а), $r = 21,5$ км — (б), $r = 34,5$ км — (в); масштаб усреднения $R = 2$ км

рассеянных сигналов заметно проявляется лишь при $r < 20$ км. Кроме того, в спектрах рассеянных сигналов наряду с абсолютным максимумом $\Delta f(r) = \Delta f_B(r)$, соответствующим когерентной компоненте первого донного отражения, при $r > 20$ км хорошо просматривается расположенный на противоположном по знаку доплеровском смещении частоты $\Delta f(r) = |\Delta f_B(r)|$ относительный максимум, отвечающий, как показали расчеты (см. рис. 4), рассеянным в обратном направлении сигналам, образованным при падении сигналов первого донного отражения на неровное дно под углами, близкими к $\theta = \arcsin\{|\Delta f_B(r)| / [v f_0 / c(H)]\}$, и испытывавшим при распространении к приемнику дополнительное отражение от дна. Поскольку максимум в $\bar{W}(\Delta f, r)$ при $\Delta f = |\Delta f_B(r)|$ почти на 30 + 35 дБ ниже основного - при $\Delta f = \Delta f_B(r)$, то на рис. 2 соответствующая ему линия не просматривается из-за ограниченности динамического диапазона при визуализации, причем, как показали расчеты (см. рис. 4), в области $0 \leq r \leq 12$ км сигналы с $\Delta f = |\Delta f_B(r)|$ должны маскироваться прямыми рассеянными сигналами, распространяющимися по "чисто" водным лучам без дополнительного отражения от дна.

Для получения пространственной (угловой) зависимости рассеянных дном сигналов, образованных при падении первичных волн давления на дно под определенным углом $\theta = \arcsin[\Delta f c(H) / f_0 v]$, достаточно на плоскости $\Delta f - r$ (см. рис. 2) сделать горизонтальный разрез доплерограммы при заданном значении Δf . Однако полученные при различных Δf зависимости $W(\Delta f, r)$ от r не дают какой-либо новой информации и поэтому здесь не приводятся.

Таким образом, показано, что как и предполагалось в / 1/, метод доплеровской томографии позволяет проводить исследования и угловой зависимости рассеянного, в данном случае неровным дном, акустического поля. Кроме того, с его помощью удалось обнаружить представляющие интерес эффекты, во-первых, наличие асимметрии в угловой зависимости рассеянных дном сигналов в определенной области расстояний, объясняющейся влиянием стратификации скорости звука на распространение волн в водном слое, во-вторых, существование в спектре рассеянного поля максимума, отвечающего рассеянному в обратном направлении сигналу.

В заключение заметим, что метод доплеровской томографии можно использовать также для определения акустических характеристик и рассеивающих свойств дна в мелководных океанических волноводах (см. / 3, 4 /).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлакова И.Б., Голубев В.Н., Харов А.И., Нечаев А.Г., Петухов Д.В., Славинский М.М. Доплеровская томография в акустике океана. // Акуст. журн., 1988. - Т.34, № 4. - С.756-758.
2. Бурлакова И.Б., Петухов Д.В., Славинский М.М. Определение акустических характеристик дна океанических волноводов методом доплеровской томографии. // Акуст. журн., 1989. - Т. 35, № 6. - С.1015-1020.
3. Лазарев В.А., Петухов Ю.В. Определение горизонтальной крупномасштабной изменчивости акустических характеристик дна мелкого моря. // Акуст. журн., 1989. - Т.35, № 5. - С.849-854.
4. Glattetre J., Knudsen T., Sjøstard K. Interference and mode filtering in shallow water: A comparison of acoustic measurement and modeling // J. Acoust. Soc. Amer. -1986. - V.86, N 2. - P.680-690.

Дата поступления статьи
4 апреля 1990 г.