

УДК 621.31.535.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ КРОТКОГО ИМПУЛЬСА НА ОТДЕЛЬНЫХ МОДАХ В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2006 г. В. А. Зверев, А. А. Стромков

*Институт прикладной физики РАН
603995, Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Статья поступила 26.05.04 г.

Рассмотрена методика численного определения направленности антенной решетки с шагом изменения задержки, много меньшим временного квантования входных сигналов. Метод применен для определения вертикальной направленности отдельных мод, выделяемых по времени их распространения в каждом гидрофоне антенной решетки. Кроме сигнала с направленностью 3 моды обнаружен дополнительный сигнал с направленностью 1 моды, незначительно опережающий сигнал 3 моды, но существенно отстающий от сигнала 1 моды. Дополнительный сигнал принимается только приемниками, расположенными вблизи дна, на основе чего сделано предположение, что этот сигнал возникает вследствие рассеяния 3 моды в дне. Опыт проводился в Баренцевом море глубиной 120 м на дистанциях 8 км и 17 км.

PACS: 43.60.c; 43.30.Vr

В последнее время усилился интерес к вопросам исследования распространения акустических волн в мелком море [1–6]. В работе [7] рассмотрен метод определения модового состава акустического поля, распространяющегося в мелком море с использованием широкополосного сигнала линейно модулированного по частоте (ЛЧМ). В [7] получен модовый состав ЛЧМ колебания, принятый отдельными гидрофонами вертикальной цепочки гидрофонов. В настоящей работе исследована работа всей вертикальной цепочки с целью определения вертикальной направленности мод, выделяемых каждым отдельным гидрофоном, методом, описанным в [7].

Поставленная задача состоит из следующих этапов. Во-первых, следует на каждом приемном гидрофоне вертикальной цепочки выделить сигнал, в котором преобладает излучение определенной моды. Следующим этапом является определение распределения амплитуды сигнала по углам в вертикальной плоскости или разложение волнового поля по плоским волнам в вертикальной плоскости с сохранением информации о времени пробега волны.

Первый этап и полученные в ходе его выполнения результаты описаны в [7]. Здесь мы кратко перечислим ход и последовательность выполняемых при этом операций. Колебание, прошедшее известный путь в мелком море, подвергается корреляции со специально подготовленным опорным колебанием. Опорное колебание представ-

ляет собою ЛЧМ сигнал, в который введена дополнительная модуляция, позволяющая учесть внутримодовую дисперсию в приближении идеального волновода Пекериса (ИВП) с жестким дном и при отсутствии поглощения. Параметры опорного колебания, такие как задержка и величина девиации частоты, подстраиваются для получения максимального значения коэффициента корреляции. Далее для определения модового состава принятого колебания в опорном колебании плавно (включая дробные значения) изменяется номер моды ИВП. Модовый состав колебания определяется по значению получающегося коэффициента корреляции принятого и опорного сигналов в момент нулевой разности хода. В [7] приведены графики полученных таким путем коэффициентов корреляции для трех приемных гидрофонов цепочки (близко к поверхности, вблизи дна и на половине глубины моря, составлявшей 120 м), для двух дистанций (8 км и 17 км).

В настоящей работе корреляционный анализ проведен для всех 32 гидрофонов вертикальной цепочки при выборе в опорном колебании одного значения номера моды, обращающего коэффициент корреляции в максимум для сигнала, принятого гидрофоном, расположенным в центре цепочки. По результатам корреляционного анализа определена угловая направленность сигнала соответствующей моды.

Опыт был поставлен в Баренцевом море при глубине моря 120 м. Прием осуществлялся стаци-

онарно установленной вертикальной цепочкой гидрофонов. Расстояние между отдельными гидрофонами цепочки $D = 3$ м; частота квантования $F = 740$ Гц. Излучение ЛЧМ сигнала производилось с борта дрейфующего судна при его удалении от точки приема до 20 км. Частота излучения линейно изменялась во времени в диапазоне примерно от 100 Гц до 300 Гц за время одного импульса. Длительность импульса $T = 5.5$ с или 4096 интервалов квантования по времени; девиация частоты $\alpha/\pi = 41.8$ Гц/с.

Методику обработки сигнала с целью получения угловой направленности моды поясним с помощью численного примера. Возьмем ЛЧМ сигнал вида:

$$A(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T}ft + \alpha t^2\right), \quad (1)$$

где T – длительность импульса; f – начальная частота в интервалах квантования по частоте (частота в Гц равна fF/T , где F – частота временного квантования сигнала); α – коэффициент, определяющий девиацию частоты. Преобразуем (1) в короткий импульс путем корреляционного преобразования по формуле:

$$K(t) = \int_0^T A(\tau)A(t+\tau)d\tau. \quad (2)$$

Пользуясь функцией (2), смоделируем сигнал на антенной решетке. Прежде всего, заметим, что для нашей цели достаточно использовать только ту часть функции (2), которая непосредственно прилегает к значению максимума. Такую же операцию по сокращению длины используемой реализации корреляционной функции мы сделаем и с реальным сигналом, существенно сократив тем самым объем необходимых вычислений с сохранением полезной информации. Для моделирования сигналов на антенне, идущих с одного определенного направления или угла, необходимо укороченные функции вида (2) сдвигать во времени на величины $n\Delta t$, где n – порядковый номер гидрофона, а Δt – необходимый минимальный сдвиг во времени. Величина интервала квантования в условиях опыта, если ее перевести в величину пробега волны за это время при скорости звука 1500 м/с, получается величиной того же порядка, что и расстояние между гидрофонами антенной решетки. В этих условиях сдвиг реализации сигнала на величину, равную интервалу квантования, соответствует чересчур большому углу, не сопоставимому с разрешающей способностью антенны. Встает вопрос о том, можно ли в данном случае точно численно смоделировать задачу и, что еще важнее, обработать экспериментальные данные с той степенью углового разрешения, которое допускает приемная антенна?

Используя ограниченность спектра сигнала, можно, дополняя его спектр нулями, уменьшить величину интервала временного квантования до величины, позволяющей реализовать потенциальное разрешение применяемой антенны. Такое решение, в принципе, приемлемо, но ведет к существенному увеличению объема вычислений.

Есть иной способ математического представления задержки сигнала, в котором задержка сигнала производится посредством коррекции фазы спектрального преобразования. В этом способе преобразованию, ведущему к задержке, подвергается не сигнал в виде функции времени, а его спектр. Как известно [8], это преобразование выглядит следующим образом:

$$U(f) = c(f)\exp\left(i\frac{2\pi}{T}f\Delta t\right). \quad (3)$$

Здесь $U(f)$ – Фурье спектр задержанного сигнала; $c(f)$ – Фурье спектр задерживаемого сигнала; Δt – величина временной задержки сигнала. В соотношение (3) можно подставлять любое значение Δt сколь угодно малое, не считаясь с тем, что это значение может оказаться меньше интервала временного квантования.

Принятый антенной сигнал моделировался сначала в одном канале посредством соотношения (1) с указанными выше параметрами, затем выполнялось преобразование (2), после чего длительность реализации с укороченным в результате преобразования (2) импульсом сокращалась в 32 раза. Затем сигнал подвергался преобразованию Фурье, и его спектр преобразовывался посредством соотношения (3) отдельно в каждом из 32 каналов по формуле:

$$U(f, n) = c(f)\exp\left(i\frac{2\pi}{T}f\Delta t(n-16)\right), \quad (4)$$

где n – номер канала. Интервал Δt в (4) составлял 0.1 от интервала временного квантования. Такая задержка, пропорциональная номеру канала, позволила смоделировать n каналов и ввести некоторое угловое смещение в моделируемый сигнал, приходящий с антенны.

Следующим этапом была обработка сигнала (4) с целью получения диаграммы направленности антенной решетки. Для этого (4) умножалось на множитель вида (3) с переменным коэффициентом, занимающим место Δt в (3). Получался сигнал вида:

$$W(f, n, j) = U(f, n)\exp\left(i\frac{2\pi}{T}fd(j-16)\right), \quad (5)$$

в котором переменная j пробегала 32 значения, а параметр d был принят 0.02 интервала временного квантования.

Для получения искомой диаграммы направленности требуется просуммировать все сигналы

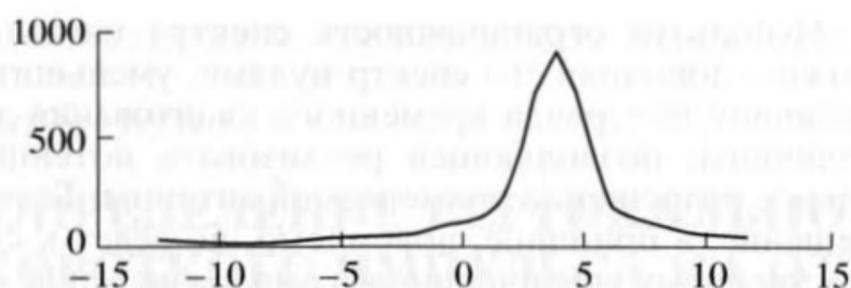


Рис. 1. Диаграмма направленности численно смоделированной вертикальной антенной цепочки, состоящей из 32 отдельных приемников. Моделирование осуществлялось по формулам (1)–(6). Вдоль вертикали отложена амплитуда сигнала в произвольных единицах. Вдоль горизонтали отложен угол в градусах.

в n каналах. Выполним эту операцию сложения всех сигналов в отдельных каналах антенной решетки:

$$S(f, j) = \sum_n W(f, n, j). \quad (6)$$

Теперь следует выполнить обратное преобразование Фурье по переменной f . В результате обратного преобразования Фурье по переменной f получаем функцию

$$Q(t, j) = \sum_f S(f, j) \exp(i2\pi ft). \quad (7)$$

Это функция времени t и набора задержек j , каждая из которых кратна $d = 0.02$ интервала временного квантования. Искомая диаграмма направленности антенной решетки заключена в функции (7). Чтобы сделать эту зависимость наглядной, достаточно взять сечение трехмерной функции (7) плоскостью $t = \text{const}$ при таком значении t , которое обращает функцию Q в максимум. В данном конкретном случае это значение $t = 0$. Можно показать, что предлагаемая операция введения задержек, много меньших интервала квантования, математически эквивалентна расширению спектра сигнала путем дополнения его нулями с одновременным уменьшением числа вычисляемых значений искомой функции.

Диаграмма направленности антенной решетки, полученная описанным выше способом, приведена на рис. 1. Чтобы получить график, в котором вдоль оси абсцисс отложены градусы (как на рис. 1), а не значения j , надо:

- значения задержек j перевести из единиц квантования в единицы времени, поделив их на частоту квантования F ;

- полученное время отнести к времени распространения звука вдоль антенной решетки между двумя соседними гидрофонами;

- полученный таким образом угол в радианах перевести в градусы.

Результаты эксперимента обрабатывались по приведенным выше формулам. Сначала выполнялось корреляционное преобразование вида (2) с ЛЧМ сигналом, в котором, согласно [7], учитывалась дисперсия одной моды. Для этого формировалось опорное колебание. Это делалось следующим образом [7].

Время прихода моды в условиях ИВП с учетом зависимости групповой скорости от частоты дается следующей формулой [1, 2];

$$\tau(\omega) = \frac{\pi^2 R c (m - 0.5)^2}{2\omega^2 H^2}, \quad (8)$$

где ω – частота; m – номер моды.

ЛЧМ колебание может быть представлено в виде:

$$A(t) = \cos[\Phi(t)], \quad (9)$$

где фаза $\Phi(t)$ описывается выражением:

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \alpha \frac{t^2}{2}. \quad (10)$$

Для учета дисперсии волн в волноводе, необходимо в выражение (9) ввести задержку (8). В [7] показано, что на этом этапе возникает проблема. Если ввести задержку формально и задержать колебание (9) согласно формуле (8)

$$P(t) = A \cos[\Phi(t - \tau(\omega))], \quad (11)$$

то колебание растягивается во времени. Это растяжение оказывает влияние на форму спектра колебания, противоположное вводимой задержке. Текущий спектр колебания, полученный путем введения задержки формулой (4), имеет не тот знак девиации частоты [7].

Для того чтобы правильно получить модулированное по частоте колебание с учетом дисперсии в волноводе, необходимо ввести задержку в фазу колебания. Изменение частоты ЛЧМ сигнала зададим в интервале времени $[0, t]$ в виде:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t. \quad (12)$$

В эту временную зависимость введем задержку согласно (8).

$$\omega = \omega_0 + \alpha(t - \tau(\omega)). \quad (13)$$

После этого из (13) найдем частоту $\omega(t)$ и затем фазу колебания $\Theta(t)$, путем интегрирования частоты $\omega(t)$ по времени в интервале от 0 до t

$$\Theta(t) = \int_0^t \omega(\xi) d\xi. \quad (14)$$

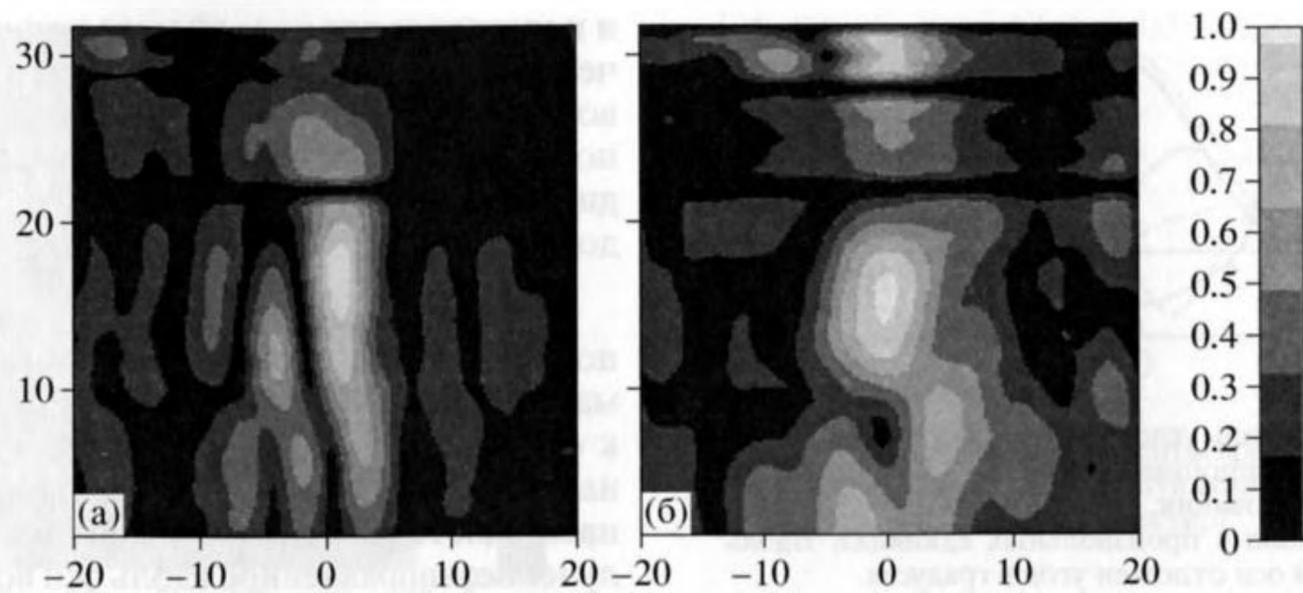


Рис. 2. Результат корреляционного преобразования сигналов, полученных в результате опыта на 8 км (а) и на 17 км (б). Вдоль вертикали отложен номер приемного элемента от 01 до 32 (вверху поверхность, снизу дно). Вдоль горизонтали отложено время в мс.

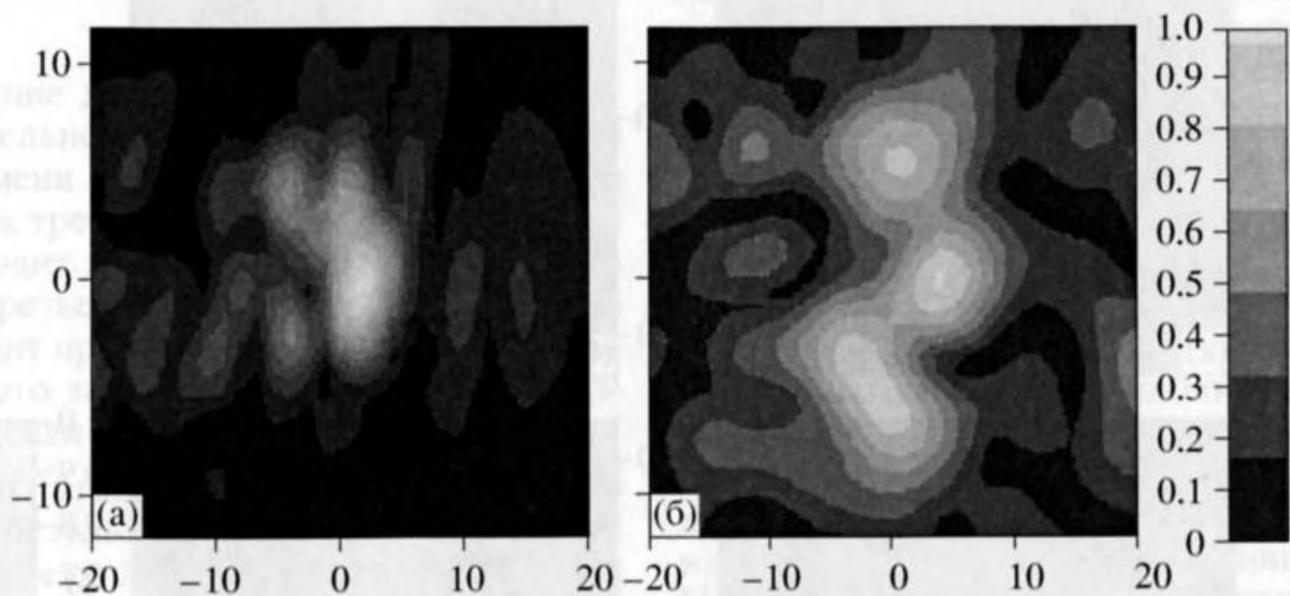


Рис. 3. Представление сигнала, принятого вертикальной антенной, в координатах угол – время на основе формул (1)–(7). Вдоль вертикали отложен угол в градусах, вдоль горизонтали отложено время в мс. Дистанция 8 км (а) и дистанция 17 км (б). Опорный сигнал в виде первой моды (а) и в виде третьей моды (б).

Таким образом, было образовано опорное колебание, которое моделирует амплитуду и фазу ЛЧМ сигнала, прошедшего через волновод Пекариса

$$P(t) = \cos[\Theta(t)]. \quad (15)$$

Для расстояния 17 км выбиралась третья мода, как наиболее сильная, а для расстояния 8 км выбиралась первая мода [7]. В результате корреляционного преобразования сигналов со всех гидрофонов с опорным сигналом получалась трехмерная функция, зависящая от двух параметров: времени и номера используемого гидрофона. Получившиеся трехмерные изображения корреляционных функций сигналов с гидрофонов показаны на рис. 2. На этих рисунках момент максимальной корреляции может быть сдвинут для сигналов всех гидрофонов одновременно. В данном случае момент максимума сдвинут так, чтобы при укорочении длины реализации после кор-

реляционного преобразования в 32 раза он оказался бы, примерно, в середине рисунка. Яркость на рисунке пропорциональна амплитуде несущей частоты, на которой наблюдается корреляционная функция. Для этого используется так называемый аналитический сигнал, представляющий собою комплексную функцию, действительная часть которой является значением действительной корреляционной функции, а мнимая часть является преобразованием Гильберта от этой функции. На графиках показан модуль аналитической функции.

На следующем рис. 3 приведены трехмерные картины модулей аналитических функций в координатах угол – время, получающиеся в результате формирования диаграммы направленности по формулам (1)–(7). Сечения рис. 3а показано на рис. 4.

Для дистанции 8 км полученный результат, показанный на рис. 3 и 4, вполне закономерен. Как

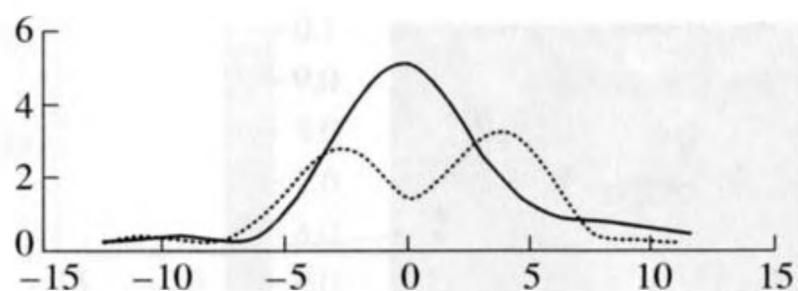


Рис. 4. Сечения вдоль угловой координаты рис. 3а при времени $t = 1$ мс (сплошная линия); $t = -5$ мс (пунктир) интервалов квантования. Вдоль вертикали отложена амплитуда сигнала в произвольных единицах. Вдоль горизонтальной оси отложен угол в градусах.

и полагается для первой моды, максимум ее излучения распространяется под нулевым углом к оси волновода. Небольшие отклонения от этой закономерности мы обсудим ниже в связи с опытом на дистанции 17 км, где подобные отклонения гораздо больше.

На дистанции 17 км исследовалась направленность излучения 3 моды. Эта мода должна иметь максимальное излучение, направленное под углом к оси волновода. Такое излучение действительно наблюдается на рис. 3б. Однако на этом рисунке наблюдается слегка опережающее по времени излучение, направленное вдоль оси волновода. Назо-

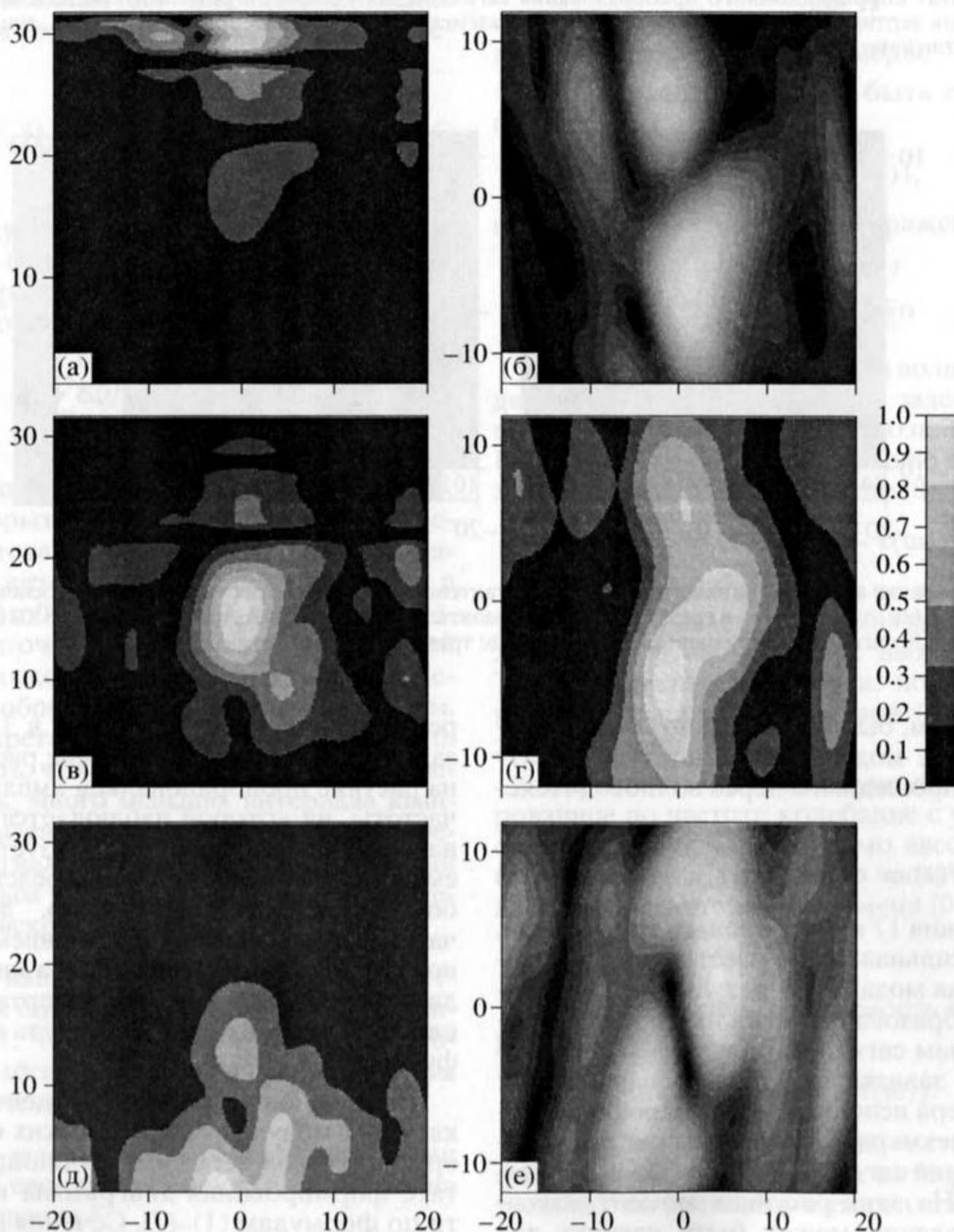


Рис. 5. Зависимость направленности излучения от глубины приема сигнала. Слева (а, в, д) поле корреляций, ослабленное со стороны дна (а), поверхности (д) и дна и поверхности (в). Справа (б, г, е) направленность излучения. Вдоль горизонтали отложено время в мс. Вдоль вертикали слева N приемника (дно внизу), справа угол в градусах.

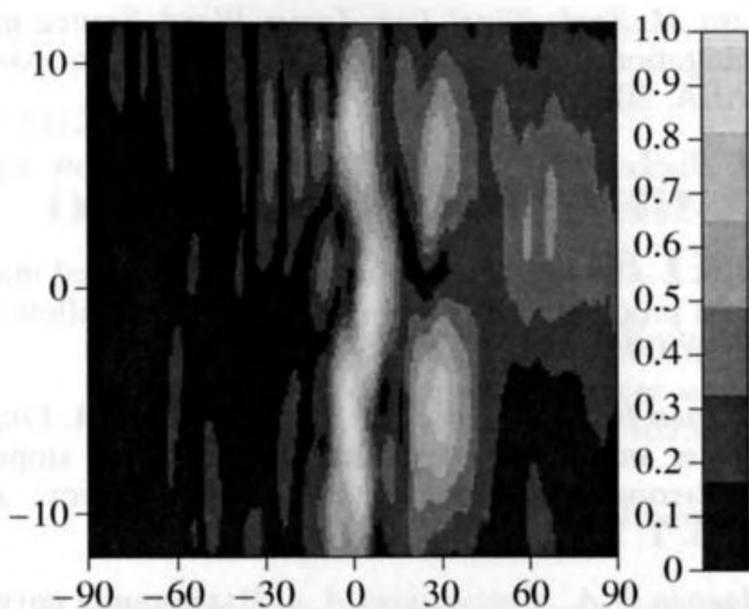


Рис. 6. Рисунок 3б в масштабе, позволяющем видеть отклики на низшие моды и их направленность. Вдоль вертикали угол в градусах, вдоль горизонтали время в мс.

вем это излучение дополнительным. Направленность дополнительного излучения присуща первой моде, а по времени распространения сигнала оно гораздо ближе к третьей моде, чем к первой. Первая мода приходит в точку приема примерно на 60 мс раньше третьей моды, а дополнительное излучение приходит примерно на 6 мс раньше третьей моды. Что это за излучение? Какова его возможная физическая природа?

Для ответа на этот вопрос было предпринято исследование, результаты которого приведены на рис. 5. На этом рисунке слева приведены поля корреляционных функций, отличающихся от приведенных на рис. 2 наличием множителей, ослабляющих прием сигналов с гидрофонов антенной решетки на ряде горизонтов приема. Это сделано путем умножения поля корреляционной функции на синусоидальные множители. На рис. 5а множитель имеет вид четверти периода синуса с нулем, приходящимся на гидрофон, расположенный вблизи дна, и максимумом, приходящимся на гидрофон, расположенный вблизи поверхности. На рис. 5б соответствующий множитель имеет вид четверти периода косинуса с нулем и максимумом, приходящимся на гидрофоны, расположенные вблизи поверхности и дна. На рис. 5в использован множитель в виде половины периода синусоиды с нулями, приходящимися на гидрофоны, расположенные вблизи дна и поверхности и максимумом, приходящимся на средний гидрофон цепочки. Справа приведены полученные при этом картины направленности в координатах угол – время.

Из результатов этого опыта следует, что дополнительное излучение в виде волны, распространяющейся в направлении первой моды, наблюдается только в том случае, когда весовой множитель усиливает сигнал, принимаемый на

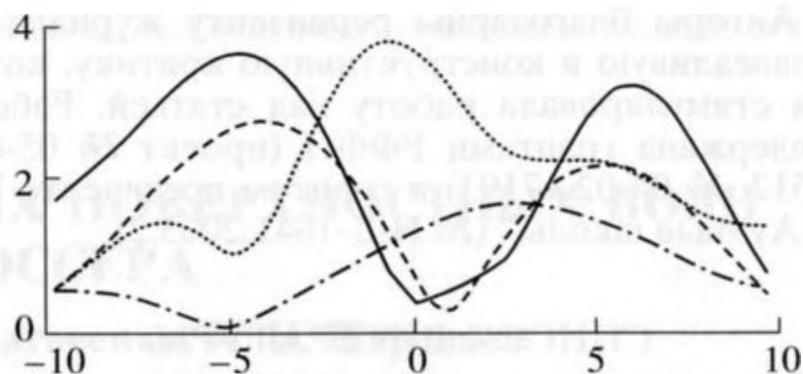


Рис. 7. Сечения рис. 7 в моменты времени: 1 мс (сплошная линия); 6 мс мелкий пунктир); 28 мс (крупный пунктир); 64 мс (штрих-пунктир).

дне. В связи с этим можно высказать предположение, что дополнительный сигнал, обладающий направленностью первой моды, принадлежит, как и полагается по направленности излучения, первой моде, которая образовалась под влиянием рассеяния (реверберации) сигнала третьей моды на дне. Малую величину опережения сигналом этой моды сигнала первой моды можно объяснить тем, что преобразование мод вследствие рассеяния в дне произошло на значительном удалении от точки излучения, вследствие чего опережение не достигло той величины, которая должна быть на 17 км.

Появление сигналов, наблюдаемых на рис. 3 и рис. 4, распространяющихся под углом к оси волновода и отстающих по времени от сигнала первой моды, может быть связано с рассеянием сигнала первой моды с образованием высших мод. На 8 км преобразование мод при рассеянии слабее выражено, чем на 17 км.

Рис. 6 повторяет рис. 3б, но в ином масштабе вдоль оси времени. На рис. 6 показан вчетверо больший промежуток времени, чем на рис. 3б. Благодаря этому на рис. 7 видны отклики не только на 3-ю моду, а также на 2-ю и 1-ю. Сечения рис. 6 при моментах времени, соответствующих различным модам, показаны на рис. 7. Эти отклики растянуты во времени, так как для их выделения использовано опорное колебание, настроенное на 3 моду. Вторая мода опережает 3 примерно на 30 мсек. Излучение этой моды, как и полагается более прижато к оси волновода, чем излучение 3 моды. Полного углового разрешения мод примененная антенная решетка не позволяет получить. Это понятно, так как примененная антенная решетка не перекрывает полностью даже водного слоя (размер антенны 96 м, а глубина моря 120 м), а мода может распространяться не только в водном слое, а и в дне. Разрешение мод достигается в этом случае комбинацией временной и угловой селекции. Первая мода опережает третью почти на 65 мс. Излучение этой моды слегка (в пределах углового разрешения антенны) отклоняется от оси волновода.

Авторы благодарны рецензенту журнала за справедливую и конструктивную критику, которая стимулировала работу над статьей. Работа поддержана грантами РФФИ (проект № 05-02-17512, № 04-02-17193) и грантом президента РФ "Научные школы" (№ НШ-1641.2003.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М. Наука. 1997. 191 с.
2. Агеева Н.С., Крупин В.Д. Частотные характеристики нормальных волн в мелком море // Акуст. журн. 1981. Т. 25. № 5. С. 669–677.
3. Philippe Roux, Mathias Fink. Green's function estimation secondary sources in a shallow water environment. // JASA. 2003. V. 113 (3). P. 1406–16.
4. Lisa M. Zurk, Nigel Lee, James Ward. Source motion mitigation for adaptive matched field processing // JASA. 2003. V. 113(5). P. 2719–31.
5. H. Bucker. Matched-field tracking in shallow water // JASA. 1994. 96 3809–3811.
6. Zurk L., Ward J. Model-based and data-based matched field processing of moving sources in a shallow water channel // JASA. 2000. V. 107. P. 2889.
7. Зверев В.А., Салин Б.М., Стромков А.А. Определение модового состава волн в мелком море при одноточечном приеме сигнала // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 221–227.
8. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.

Determination of the Vertical Directivity of a Short Pulse Transmission at Individual Modes in a Shallow Sea

V. A. Zverev and A. A. Stromkov

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603950 Russia
e-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Abstract—A method for the numerical determination of the directivity of an antenna array is considered with delay increments much shorter than the sampling period for the input signals. The method is used for determining the vertical directivity of individual modes specified according to their travel times at each hydrophone of the array. In addition to the signal with the directivity of the third mode, a signal is observed with the directivity of the first mode, which slightly advances the signal of the third mode but arrives noticeably later than the first-mode signal. The additional signal is received only by the hydrophones positioned near the sea bottom. This fact suggests a conclusion that the additional signal is caused by the scattering of the third mode from the bottom. The experiment is performed in the Barents Sea with a depth of 120 m at distances of 8 and 17 km.