

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.3.535.2

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПРОТЯЖЕННОСТЬ ОБЛАСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛН

© 2008 г. В. А. Зверев, П. И. Коротин, А. А. Стромков

*Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*

E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 29.05.07 г.

В натурном опыте в мелком море (на акватории Баренцева моря с глубинами 120 м) получен значительный выигрыш в отношении сигнала к шуму для сигнала, принятого от излучателя на удалении 12 км, при согласовании со средой по сигналу от того же излучателя на удалении 10.5 км. Для интерпретации данного факта выполнено численное моделирование размеров области фокусировки сигнала при временном обращении волн (ВОВ) для идеального волновода с мягким дном. Показано, что для узкополосных сигналов вдоль трассы на протяжении ± 5 км от точки излучения обрабатываемого сигнала по всей глубине волновода наблюдается регулярная интерференционная картина, максимумы которой сравнимы с главным. При ширине спектра от 100 до 300 Гц наблюдается уже только главный максимум протяженностью порядка 100 м и на одной глубине.

PACS: 43.60.Tj, 43.30.Vh, 43.30.Wi

В задачах распространения волн в мелком море эффективным экспериментальным методом для согласованной фильтрации широкополосных сигналов является временное обращение волн (ВОВ) [1–7]. В [1] содержится обзор большого числа работ, посвященных принципам ВОВ и основным практическим приложениям, включающим и акустику мелкого моря. В [2] дан анализ принципов ВОВ в сравнении с обращением волнового фронта (ОВФ) в монохроматическом поле. Показано, что между ВОВ и ОВФ существует полная аналогия, если в ВОВ рассматривать временную переменную сфокусированного сигнала, а в ОВФ – пространственную. В [3] приведены результаты фокусировки волн, полученные ВОВ в условиях мелководных районов Средиземного моря, в координатах “глубина моря – время”. Источник сигнала, используемого для согласования со средой, находится в том же месте, где измеряется результат ВОВ, и исследованы возможности ВОВ на различных дистанциях вплоть до 30 км, а также стабильность фокусировки через большое время порядка 10 дней после посылки в среду пробного сигнала. В [4–6] получены практические результаты, состоящие в уменьшении уровня донной реверберации при использовании ВОВ в активной гидролокации.

В указанных экспериментальных исследованиях исследовались результаты ВОВ в координатах “глубина волновода – время”, то есть временная фокусировка обращенного сигнала. Значительный интерес представляет также результат

исследования ВОВ в координатах “глубина-дальность”, то есть пространственная фокусировка обращенного поля, чему до сих пор в условиях мелкого моря не уделялось внимания.

С этой целью используем результаты натурального опыта в Баренцевом море [7, 10] по приему широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией на разных дальностях от излучателя. Прием ЛЧМ сигнала, а также любого известного сигнала, позволяющего определить частотную характеристику среды (ЧХС), дает возможность согласовать принятый сигнал со средой [7] и получить выигрыш в отношении сигнала к шуму. В [8] таким путем получен выигрыш в 6–10 дБ при приеме сигнала с 12 км, что эквивалентно почти десятикратному увеличению эффективной апертуры антенны. Оказалось, что выигрыш в 3–5 дБ удается получить, если сигнал, принятый с 12 км, согласовывать с помощью ЧХС, измеренной для дистанции 10.5 км. Аналогичные результаты получаются и для других дистанций: даже при больших расстояниях до точки согласования не наблюдается общего для всех частот провала выигрыша в отношении сигнал/шум после согласования принятого сигнала со средой.

Из результатов экспериментов возникает вопрос о пространственной протяженности области фокусировки сигнала при ВОВ в направлении вдоль трассы распространения. Исследовать этот вопрос для произвольной трассы можно только экспериментально. Для грамотного планирования измерений необходимо предварительно про-

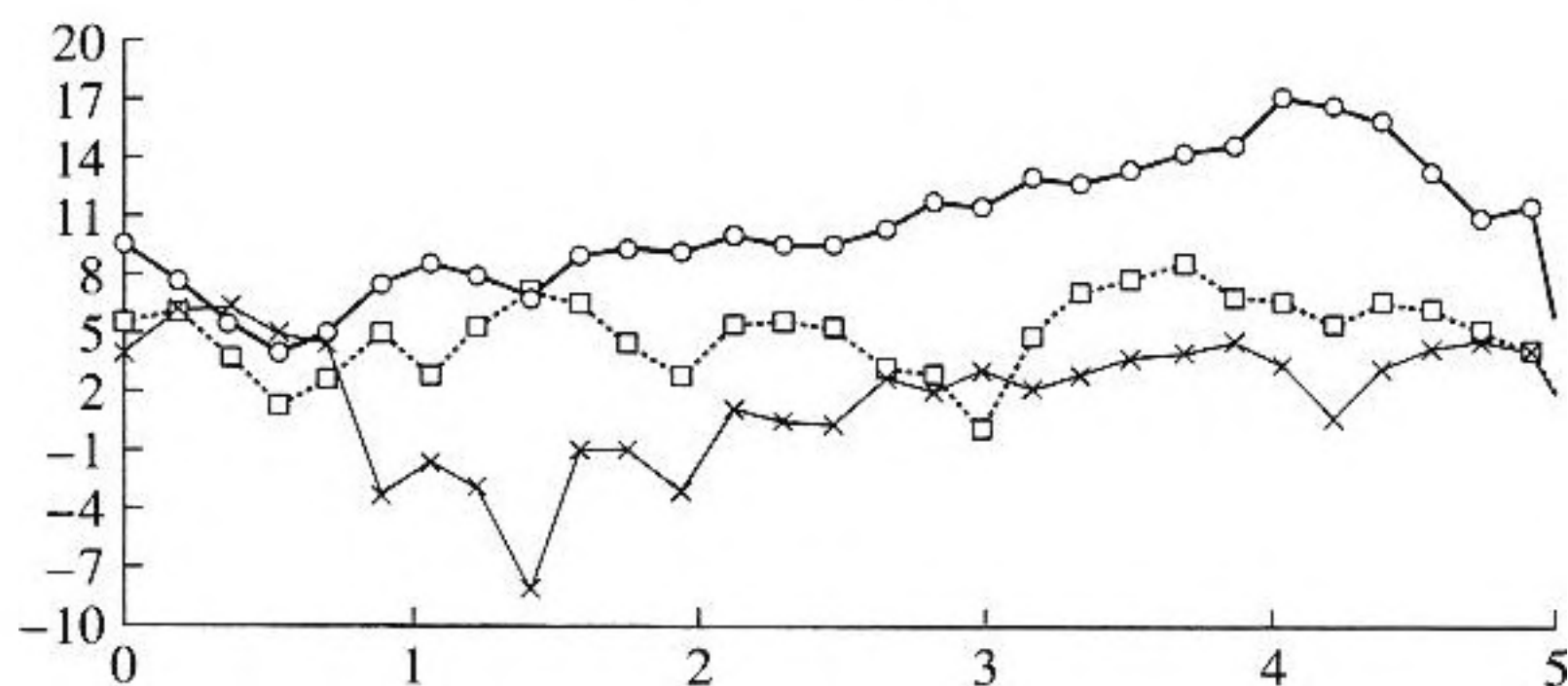


Рис. 1. Результаты эксперимента по согласованной обработке ЛЧМ сигналов для точки А на расстоянии 12 км. Кружками отмечен выигрыш согласованной обработки относительно некогерентного сложения при использовании для согласования сигнала, излученного на 60 секунд ранее (удаление 10 м от точки А). Квадратиками — тот же выигрыш для сигнала, излученного на 5 часов ранее (удаление 1.5 км от точки А). Крестиками помечена разность уровней выходного сигнала с антенны при когерентном и некогерентном сложении. Вдоль горизонтали — время в секундах (изменение частот от 100 до 300 Гц). По вертикали — выигрыш в дБ.

вести численное моделирование для известных параметров трассы на основе имеющихся данных. В указанном эксперименте известен модовый состав поля и параметры этих мод [9–11]. Проведенной обработкой [9–11] установлено, что в условиях натурального опыта в диапазоне частот 100–300 Гц, сигнал распространяется на первых модах, число которых не превышает 6 при общем возможном числе мод порядка 30 и более. В этих условиях допустимо существенное упрощение процедуры численного моделирования акустического поля в волноводе. При расчетах можно не учитывать поле, распространяющееся в дне, а ограничиться полем в водном слое с учетом импеданса дна и использовать простейшую теоретическую модель в виде идеального волновода с мягким дном с учетом шести первых мод. В нашем случае для анализа результатов согласованной обработки сигналов нет необходимости в расчетах точно воспроизводить условия распространения волн, скорее наоборот, более полно можно интерпретировать явление, взяв его простейшую модель с основными чертами реальной акустической трассы.

В эксперименте вертикальная приемная антенна, состоящая из 32 приемных элементов, расположенных эквидистантно с шагом в 3 м на длине 93 м, была установлена на дне на глубине 120 м стационарно и автономно. Сигналы со всех элементов антенны записывались с помощью многоканального устройства в память. Судно с излучателем в дрейфе излучало широкополосный (100–300 Гц) импульсный ЛЧМ сигнал длительностью около 5 сек, поэтому имелась возможность получать сигналы с различных дальностей.

В эксперименте, приняв сигнал из точки А, выбранной для согласования, можно, изменив направление принятого сигнала во времени на обратное, послать этот сигнал обратно в среду.

В среде мы получим сигнал, сфокусированный в точку А. Для численной фокусировки достаточно измеренный сигнал согласовать со средой с помощью фильтра, построенного на основе принятого из точки А сигнала. Для этого следует определить частотную характеристику среды по формуле [7]:

$$z_{A,n}(\omega) = \frac{u_n(\omega)}{a(\omega)}, \quad (1)$$

где ω — частота; $u_n(\omega)$ — спектр сигнала, принятого приемником антенны номера n из точки А; $a(\omega)$ — спектр излученного сигнала из точки А. Для выполнения процедуры согласования сигнала со средой спектр принятого сигнала надо умножить на согласующий множитель вида

$$SM_n(\omega, R_0) = \frac{|z_{A,n}(\omega)|}{z_{A,n}(\omega)}. \quad (2)$$

Здесь R_0 — расстояние от приемной антенны до точки А.

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты. Крестиками показана разность уровней (под уровнем в дБ мы понимаем $10 \log$ (интенсивности сигнала)) выходного сигнала с антенны при когерентном сложении сигналов и некогерентном сложении тех же сигналов. Заметим, что выигрыш в отношении сигнала к шуму при некогерентном сложении не зависит от размера антенны. Это выигрыш, получаемый с одного приемника антенны при его усреднении по всей приемной апертуре. Поэтому то, что показано на рис. 1 в дБ является выигрышем (или проигрышем при отрицательных значениях) антенны относительно приема на одиночный приемник. На рисунке показано также сравнение результатов применения согласованной обработки к сигналу, излученному практически сразу перед согласующим сигналом (СС) (отличие на период следования 60 сек),

и излученному на 5 часов ранее. Как видно из рис. 1, согласование дает эффект (выигрыш превышает эффект простого когерентного сложения) и для точки, удаленной на 1.5 км от источника СС. Отсюда возникает вопрос о том, как зависит величина получаемого выигрыша от разности расстояний, с которых излучались согласуемый сигнал и СС, или как часто надо размещать источники СС в мелком море.

Для экспериментального изучения ВОВ обычно используют две вертикальные антенны [3]. Назовем их антеннами (А1) и (А2). Антенна А1 – приемо-излучающая, антенна А2 помещается рядом с источником СС для анализа результатов ВОВ.

Фурье спектр поля ВОВ на А2 определится в результате следующего действия [2, 7]:

$$P(j, \omega, R, R_0) = \sum_n ZS_{j,n}(\omega, R) ZS_{s,n}^*(\omega, R_0) a^*(\omega). \quad (3)$$

Здесь R – расстояние от А1 до А2, R_0 – расстояние СС до антенны А1; знак (*) означает комплексное сопряжение; j – номер точки на А2 по глубине, совпадающей по глубине с источником СС; n – номер приемника А1; s – номер приемника А2. $ZS_{j,n}(\omega, R)$ – частотная характеристика среды (ЧХС) между точками среды “ j ” и “ n ”. Фурье спектр излучаемого сигнала обозначен $a(\omega)$. Для определения поля, получаемого с помощью ВОВ, следует произвести обратное преобразование Фурье от выражения (3) по переменной ω .

В формуле (3) комплексно сопряженные множители представляют собой спектр сигнала, принятого приемниками А1, после обращения во времени, а $ZS_{j,n}(\omega, R)$ учитывает распространение волны от А1 к А2.

Из (3), следует, что в точке $s = j, R = R_0$ произведение ЧХС на свою комплексно сопряженную величину даст квадрат модуля ЧХС, а комплексный спектр посланного сигнала после обратного преобразования Фурье перейдет в сам сигнал с обратным знаком во времени. В этом и заключается временная фокусировка волны в точке источника СС. Что будет при этом в других точках пространства при $n \neq j$ и $R \neq R_0$ зависит от ЧХС, то есть условий распространения.

Из (3) следует, что для решения поставленной задачи – вычисления обращенного поля для любых расстояний – необходимо вычислить матрицу ЧХС среды. Чтобы воспользоваться при вычислениях предложенной выше упрощенной моделью волновода, преобразуем (3) к виду, содержащему вместо ЧХС между отдельными точками частотные характеристики мод (ЧХМ) волновода. Для осуществления такого преобразования достаточно поля, входящие в (3), представить в

виде суммы мод волновода. В этом случае формула (3) примет вид:

$$P(j, \omega, R, R_0) = \sum_m W_{m,j} ZP_m(\omega, R) W_{m,s} ZP_m^*(\omega, R_0) a^*(\omega). \quad (4)$$

Здесь $ZP_m(\omega, R)$ – частотная характеристика моды номера m на расстоянии R ; $W_{m,j}$ – форма моды номера m , возбуждаемая или принимаемая на глубине точки j .

Для вычисления результата обращения с помощью (4) требуется знать форму мод, возбуждаемых в волноводе, и вид частотной характеристики моды. И то и другое содержится в монографии Б.Г. Кацнельсона и В.Г. Петникова [11], посвященной акустике мелкого моря. Форму моды волновода с мягким дном запишем в следующем виде [11]:

$$W_{n,m} = \sin\left(\frac{\pi}{N} nm\right). \quad (5)$$

Здесь N – число приемников в вертикальной антенне, перекрывающей весь водный слой волновода; n – номер приемника, считая от поверхности; m – номер моды.

Для получения $ZP_m(\omega, R)$ надо проинтегрировать по частоте приведенное в [11] выражение для запаздывания моды по групповой скорости в рассматриваемом нами приближении Пекериса. Покажем, как получить $ZP_m(\omega, R)$ более общим путем, что даст возможность использовать ее для монохроматического сигнала, к которому понятие групповой скорости следует уточнять.

Исходим из того, что отклик линейного устройства на входное воздействие в виде $\exp(i\omega t)$, где ω – частота; t – время, равен $z(\omega)\exp(i\omega t)$, где $z(\omega)$ – комплексная частотная характеристика. Согласно этому для плоской волны Бриллюэна вида $\exp(i\omega t - kR)$, суммой которых является мода, частотная характеристика имеет вид:

$$Z(\omega) = \exp(ikR). \quad (6)$$

Волна Бриллюэна распространяется в волноводе под углом к горизонту:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2H} m, \quad (7)$$

где λ – длина волны; H – глубина волновода; m – номер моды. Учитывая (7), ЧХМ можно записать в виде:

$$ZP_m(\omega, R) = \exp(ikR \cos \alpha). \quad (8)$$

В общем случае мода распространяется не только в водном слое, а и в толще донных осадков. Мы не рассматриваем этот случай, ограничив себя диапазоном достаточно высоких частот

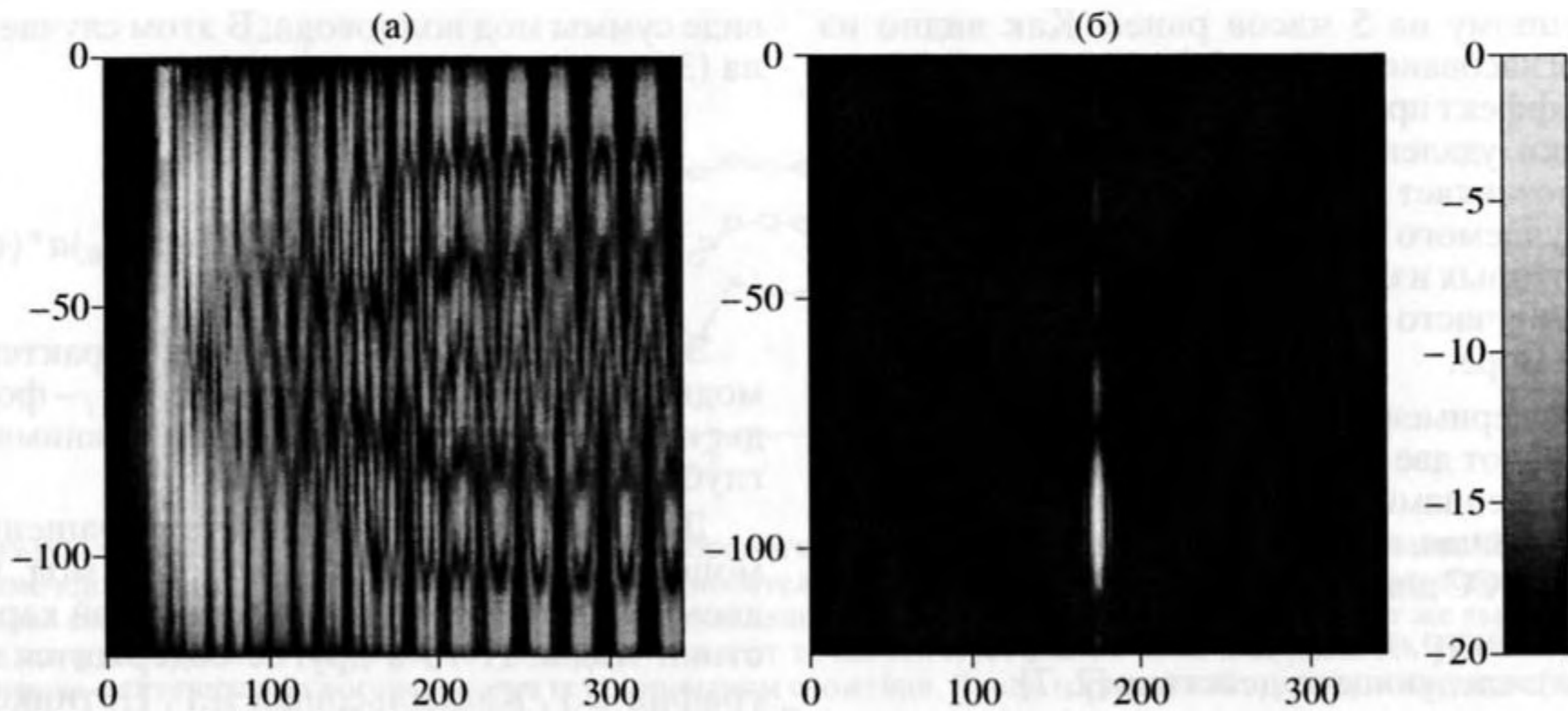


Рис. 2 Тестовый пример для проверки правильности использованных приближений: "а" – модуль принятых сигналов на антенне А1 от импульсного СС в точке на расстоянии 30 км и глубине 90 м; "б" – модуль сигнала на антенне А2 после обращения. Вдоль горизонтали – время в мсек. По вертикали – глубина моря в метрах.

и учетом мод с низкими номерами при большом общем числе распространяющихся мод. В этом приближении $\alpha \ll 1$ и можно в (8) разложить косинус в степенной ряд. Первый член разложения представляет собой частотную характеристику, вызванную задержкой сигнала на время $t = r/c$, где c – скорость звука и его можно опустить. ЧХМ с учетом только второго члена разложения в ряд примет вид:

$$ZP_m(\omega, R) = \exp\left(i \frac{Rc\pi^2}{2H^2\omega} m^2\right). \quad (9)$$

Из (9) формула для группового запаздывания моды, приведенная в [11], получается путем дифференцирования по частоте.

Таким образом, в (4) посредством (5) и (9) определены в рассматриваемом нами приближении все функции, и можно вычислить поле, получающееся в среде после ВОВ на любых расстояниях, как совпадающих с положением источника СС, так и отличающихся от него. Пусть источник СС неподвижен, а антенна А2 будет располагаться на различных расстояниях и принимать сигналы, излученные антенной А1, после обращения СС во времени.

Используемый здесь метод математического моделирования распространения волн в волноводе основан на ряде приближений и упрощений. Поэтому метод нуждается в проверке на соответствие получаемых результатов ожидаемым известным результатам. Прежде, чем переходить к получению новых результатов, сначала получим известные, чтобы убедиться, что принятые нами упрощения действительно позволяют правильно описывать распространение волн в волноводе.

Результаты тестовых вычислений приведены на рис. 2 для СС в виде коротких импульсов с Фурье спектром, равным единице в диапазоне частот 100 Гц – 300 Гц. Этот сигнал излучался на расстоянии 30 км от А1 на глубине 90 м при глубине моря 120 м. На рисунке 2а показаны модули импульсов, принятых антенной А1 на первых 6 модах. На рис. 2б показан рассчитанный численно классический вариант использования ВОВ. Обращению подвергались сигналы, модули которых показаны на рис. 2а. Результат обращения вычислен по формуле (4) при $R = R_0$. Как видно из рисунка, результат получился в точности таким, каким он должен быть согласно [1, 3] и другим работам. Максимальный сигнал четко локализован на той глубине, на которой находится СИС. Результат вычислений, показанных на рис. 2, можно кратко сформулировать так: до обращения (а), после обращения (б). Эти графики достаточны для подтверждения применимости принятой упрощенной методики к вычислению результатов ВОВ в волноводе.

Для изучения продольных размеров фокального пятна при ВОВ нами использованы 4 вида СС с источником на различных расстояниях от А1. Прежде всего, это ЛЧМ сигнал длительностью 5 секунд. В точности такой сигнал применялся нами в экспериментах в Баренцевом море [7–10]. Такой сигнал удобен тем, что в нем время однозначно связано с частотой. Поэтому получающаяся в результате зависимость сигнала от времени дает представление о зависимости результата от частоты без дополнительного спектрального анализа. Спектр этого сигнала показан на рис. 3а, а результаты использования на рис. 4. Следующие три вида сигналов отличаются шириной спектра. Короткий импульс имеет спектр,

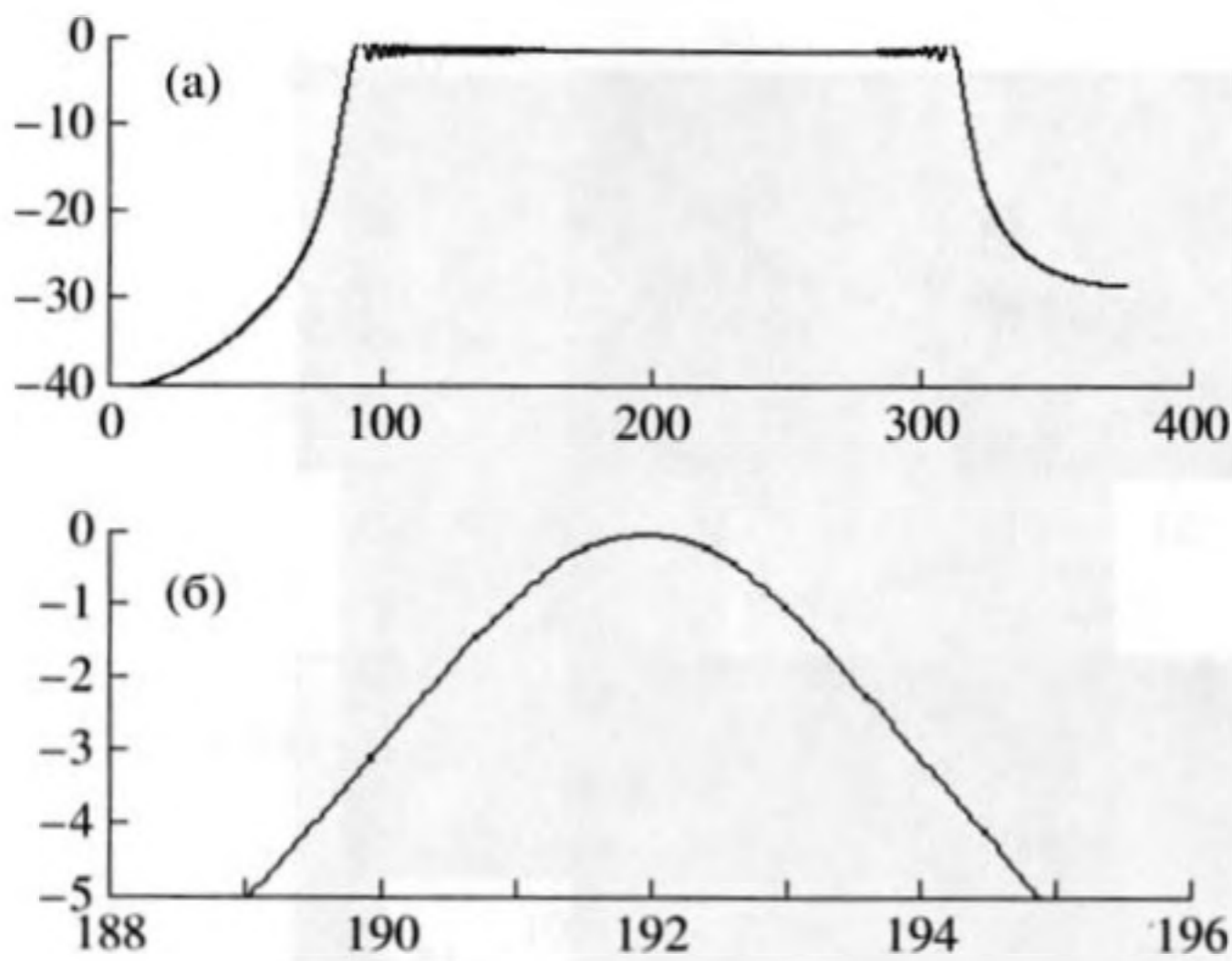


Рис. 3. Модули спектров сигналов, использованных при расчетах: "а" – модуль спектра ЛЧМ сигнала; "б" – модуль спектра узкополосного сигнала. Вдоль горизонтали – частота в Гц. По вертикали – уровень в дБ.

равный 1 в диапазоне от 100 Гц до 300 Гц. Этот сигнал использован для тестовых вычислений, результаты которых приведены на рис. 2. Расчеты выполнены также для узкополосного сигнала с гауссовой формой спектра шириной 4 Гц по уровню 3 дБ (рис. 3б) и чисто монохроматического сигнала. Результаты, полученные при использовании этих сигналов, показаны на рис. 5.

При расчетах источник СС находился на удалении 30 км от А1 на глубине 90 метров. Вычислялся модуль сигнала с отдельного гидрофона антенны А2 при изменении ее удаления от А1 с 25 км до 35 км через 100 метров. На рисунках 4 и 5 показан в логарифмическом масштабе модуль обратного преобразования Фурье (4) по переменной ω .

На рис. 4а и 4б вдоль вертикали фактически отложена частота в диапазоне от 100 до 300 Гц. Можно считать, что на этом рисунке по вертикальным секущим мы видим частотную зависимость обращенного сигнала на различных расстояниях для двух глубин. Как видно из рисунка, зависимость имеет интерференционный характер с регулярно чередующимися максимумами и минимумами, отличающимися по величине в пределах 2–3 дБ.

На рис. 5 показаны картины поля при ВОВ, отличающиеся от показанной на рис. 2б только тем, что по горизонтали отложено удаление А2 от А1. Расчет выполнен по формуле (4) с последующим обратным преобразованием Фурье по переменной ω , как и на рис. 2б. В качестве СС в этом расчете использованы сигналы, отличающиеся шириной спектра $a(\omega)$. На рис. 5а показан результат ВОВ в зависимости от дистанции для наиболее

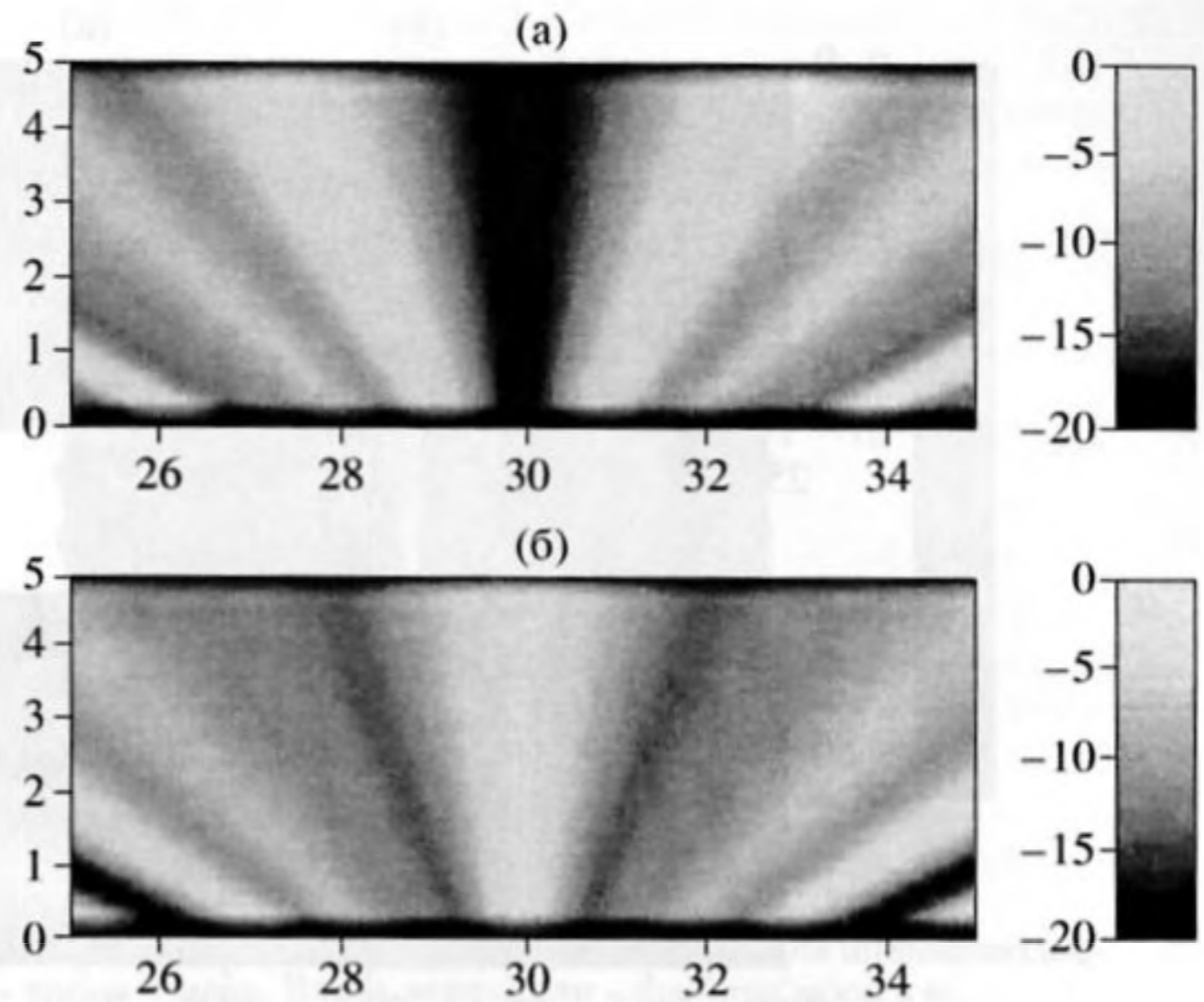


Рис. 4. Пространственно-временное распределение обращенного поля для СС в виде ЛЧМ сигнала. Показано распределение модуля сигнала с одного гидрофона антенны А2 на глубине 30 м (а) и 90 м (б). Источник СС на $R = 30$ км и глубине 90 м. По горизонтали – удаление приемника от А1 в километрах. По вертикали – время в сек (соответствует частотам от 100 до 300 Гц). Шкала яркости в дБ.

короткого импульса с широким спектром. На рис. 5б этот же результат показан в более крупном масштабе по дальности (расчет через 20 метров) и в большем динамическом диапазоне. Из этого рисунка видно насколько узкой (порядка 100 метров) по продольной координате получается область фокусировки сигнала при его обращении. При этом из сравнения рис. 5б и 2б видно, что пространственная фокусировка обращенного поля дает значительно больше корреляционных шумов, нежели фокусировка временная.

Сравнить результаты фокусировки в зависимости от ширины полосы можно по рис. 5а, 5в и 5г. При уменьшении полосы сигнала интерференционная картина становится богаче и имеет больше максимумов, сравнимых с уровнем главного. Наблюдается также перемещение максимумов по глубине. Каждый отдельный максимум по продольной координате является столь же узким, как и главный. Попасть на такой максимум и, соответственно, использовать его практически трудно. Начиная с определенной полосы, существенной разницы между результатами расчетов с использованием узкополосного сигнала и монохроматического сигналов нет.

Малые размеры области фокусировки означают, что применение ВОВ требует стационарной установки антенн при исследовании пространственных характеристик обращенного поля в экспериментах, подобным описанным в [3]. Заме-

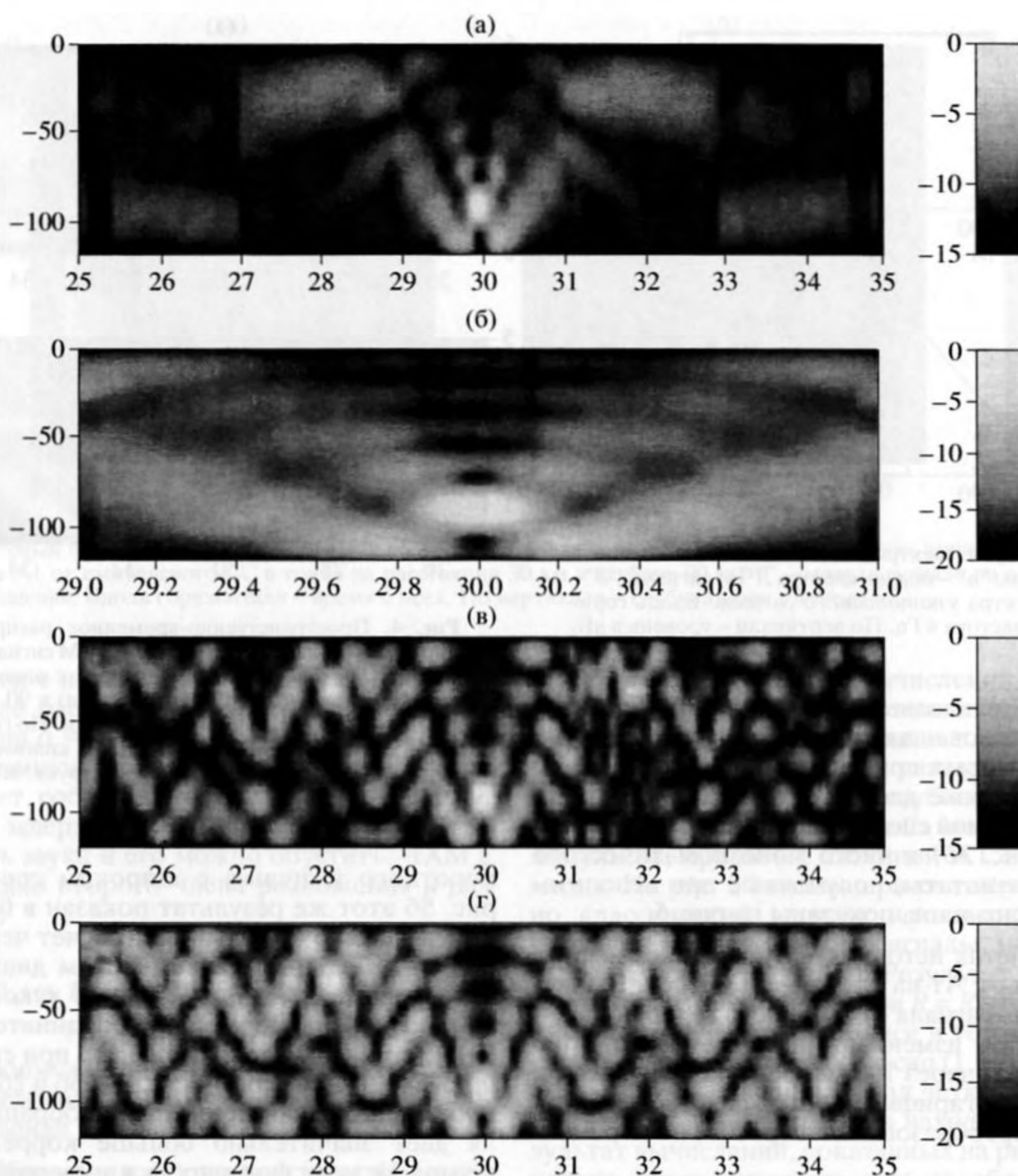


Рис. 5. Пространственные распределения обращенного поля для СС в виде широкополосного импульса ("а" и "б"), узкополосного импульса "в" и тонального сигнала "г". По вертикали глубина моря в метрах. По горизонтали – удаление А2 от А1. Рисунок "а" отличается от "б" масштабом по дальности. Шкала яркости в дБ.

тим, что приведенные результаты не зависят от расстояния А1 до источника СС, так как существенна только зависимость удаления антенны А2 от источника СС.

Таким образом, выигрыш, показанный на рис. 1, полученный за счет согласования антенны со средой с помощью источника СС, находящегося за 1.5 км от цели, сигнал которой надо выделить, возможен в других аналогичных условиях и для больших удалений. Об этом свидетельствуют результаты, приведенные на рис. 4 и 5, где виден существенный выигрыш в отдельных областях частот при согласовании приемной антенны со средой с помо-

щью СС, находящегося на значительном расстоянии от точки излучения сигнала.

Выше приведены результаты обращения, взятые в один момент времени, когда обращаемый сигнал по своему уровню максимален. Между тем картина, наблюдаемая на А2, информативна и во времени, особенно при широкополосном сигнале. Это показано на рис. 6. На этом рисунке показан результат обращения волн, выполненный точно также, как на рис. 2б, но для иных дистанций относительно источника СС. На рис. 2б показан результат ВОВ при нулевом расстоянии источника СС до А2. Для рис. 6а и 6б антенна А2 отнесена от источника СС, соответственно, на 5 км ближе и

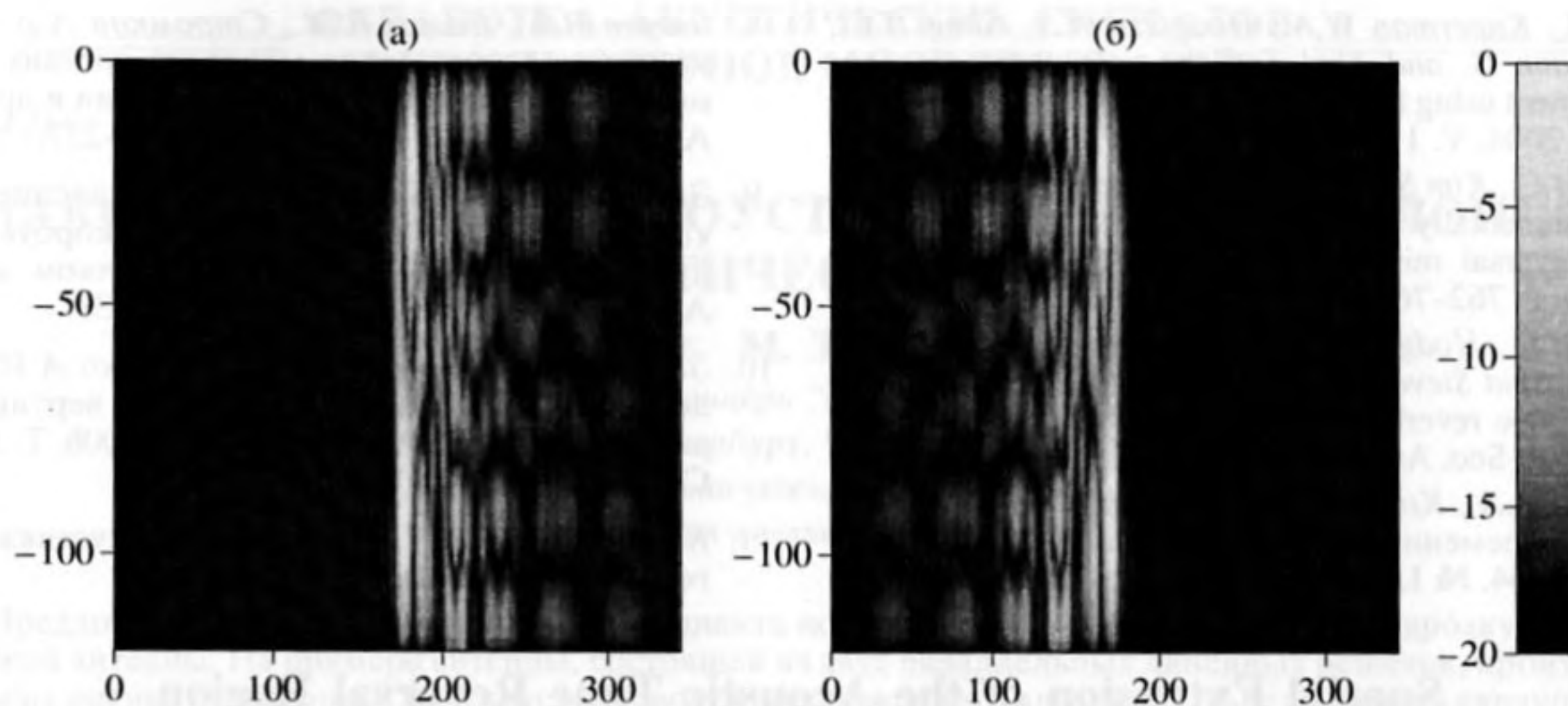


Рис. 6. Модули сигналов на А2 на дистанциях 25 км (а) и 35 км (б), полученные в результате обращения широкополосного СС, удаленного от А1 на 30 км. Вдоль горизонтали – время в мсек. Вдоль вертикали – глубина моря в м.

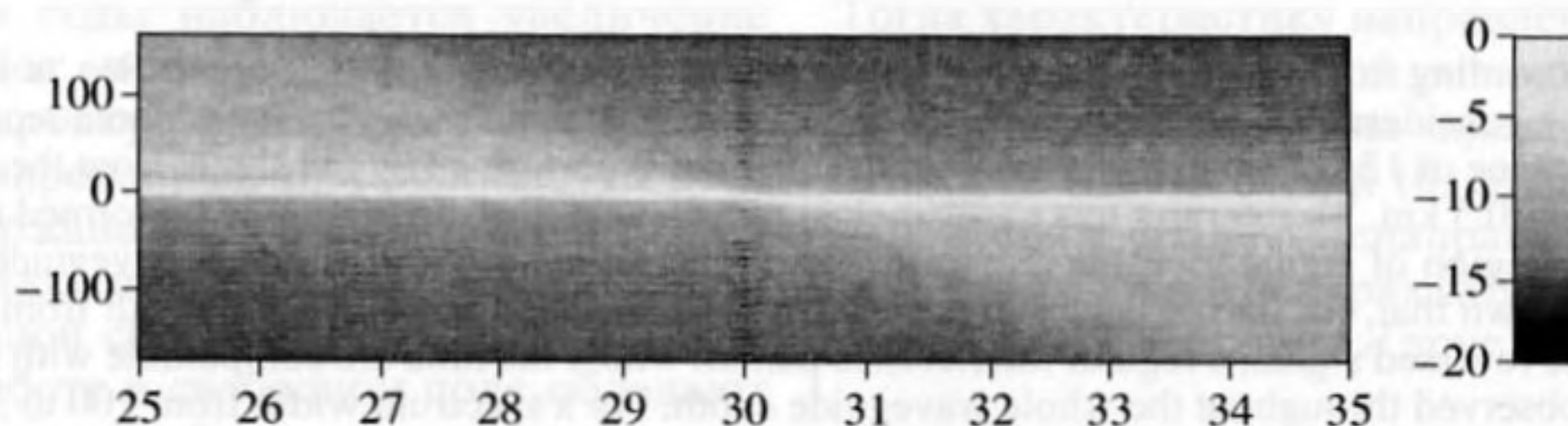


Рис. 7. Результат некогерентного сложения сигналов всех приемников антенны А2 при обращении источника широкополосного СС, отстоящего на 30 км от А1. Вдоль горизонтали – расстояние А2 от А1 в км. Вдоль вертикали – время в мсек.

дальше от А1. В результате на рисунках видно дисперсионное затягивание сигнала. Ближе к А1 сигнал еще не успел “собраться” в исходный СС, на больших расстояниях он уже опять начал “рассыпаться”. По знаку этой реверберации и по ее протяженности во времени можно однозначно определять положение антенны А2 относительно источника СС. Чтобы это можно было делать точнее, сигналы А2 должны быть соответствующим образом усреднены. Результаты одного из способов усреднения показаны на рис. 7.

На рис. 7 приведен результат некогерентного сложения сигналов на антенне А2 со всех ее приемных элементов в зависимости от времени и положения А2 относительно дистанции расположения источника СС. При этом наблюдается усредненная вдоль антенны картина реверберации, обусловленная дисперсией среды. Минимальное время реверберации получается при полном согласовании сигнала со средой, когда источник СС находится рядом с А2. Эта картина замечательна тем, что, ориентируясь по ней, можно найти точку максимального согласования, что вряд ли

удастся сделать, ориентируясь по максимуму интенсивности сигнала на рис. 5а.

Авторы глубоко признательны рецензенту журнала за замечания, учет которых дал возможность существенно улучшить текст статьи. Работа поддержана грантами Федерального агентства по науке и инновациям (контракт № 02.445.11.7480), РФФИ (№ 05-02-17512, № 07-02-01205, № 08-08-97054), грант Президента РФ “Ведущие научные школы” (№ НШ-1641.2003.2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fink M., Cassereau D., Derode A., Prada C., Roux P., Tanter M., Thomas J.-L. and François Wu. Time-reversed acoustics // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1933–1995.
2. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография. // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 685–693.
3. Hodgkiss W.S., Song H.C., Kuperman W.A., Akal T., Ferla C. and Jackson D.R. A long range and variable focus phase conjugation experiment in shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. P. 1597–1604.

4. Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Edelmann G. and Akal T. Echo-to-Reverberation enhancement using a time reversal mirror // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. V. 115. P. 1525–1531.
5. Song H.C., Kim S., Hodgkiss W.S. and Kuperman W.A. Environmentally adaptive reverberation nulling using a time reversal mirror // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. V. 116. P. 762–768.
6. Song H.C., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A., Roux P., Akal T. and Stevenson M. Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2005. V. 118. P. 1381–1387.
7. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Численное временное обращение волн. // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 1. С. 58–64.
8. Зверев В.А., Салин Б.М., Стромков А.А. О возможности определения модового состава волн в мелком море при точечном излучении и приеме. // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 221–227.
9. Зверев В.А., Стромков А.А. Определение вертикальной направленности излучения короткого импульса на отдельных модах в мелком море. // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 2. С. 33–39.
10. Зверев В.А., Стромков А.А., Хилько А.И. Выделение мод мелкого моря с помощью вертикальной антенной решетки // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 6. С. 676–682.
11. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.

Spatial Extension of the Acoustic Time Reversal Region

V. A. Zverev, P. I. Korotin, 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—According to the data of a full-scale shallow-water experiment (in the Barents Sea, at sea depths of about 120 m), a considerable gain in the signal-to-noise ratio is obtained for an acoustic signal received from a source at a distance of 12 km when matching with the medium is performed by the signal from the same source at a distance of 10.5 km. To interpret this experimental fact, a numerical simulation is performed to determine the size of the region of signal focusing due to the time reversal of waves in an ideal waveguide with a soft bottom. It is shown that, for narrowband signals, within a distance of ± 5 km along the path from the point of emission of the reversed signal, a regular interference pattern whose maxima are comparable with the principal maximum is observed throughout the whole waveguide depth. For a spectrum width from 100 to 300 Hz, only the principle maximum with an extension of about 100 m is observed at a single depth.