

ДИСПЕРСИОННЫЙ И УГЛОВОЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ МОД
В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2011 г. А. А. Зверев, П. И. Коротин, А. Л. Матвеев, А. А. Стромков

*Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru
Поступила в редакцию 18.01.10 г.*

В Баренцевом море выполнен опыт, позволивший построить картину модовых сигналов, излученных точечным источником на дистанциях 7 км и 10 км. Получена картина сфокусированных обращением времени сигналов мод в координатах “номер моды – групповое запаздывание”. Использованный алгоритм основан на совпадении частотных характеристик мод реального волновода и идеального волновода мелкого моря. Предложен механизм явления, объясняющий наблюдаемые результаты.

ВВЕДЕНИЕ

Распространению сигналов в мелком море в последнее время уделяется большое внимание [1–17]. Этому вопросу посвящена монография [12]. Особо отметим красивые опыты [5] по обращению акустических волн в мелком море на дистанциях 10–30 км в Средиземном море. В них среда являлась вычислительным устройством, которое по принятому сигналу определяло и воспроизводило поле точечного источника звука, помещенного на глубине. Поле источника среда воспроизводила точно в том месте, где располагался его источник. Чтобы использовать среду для вычисления и воспроизведения поля она должна быть достаточно стабильной, в ней должны отсутствовать какие-то течения. В результате опыта было установлено, что среда Средиземного моря в районе проведения опыта достаточно стабильна, по крайней мере, в течение недели [5].

Нами несколько позже был поставлен аналогичный опыт в Баренцевом море [1, 2, 11, 13–16]. Однако мы не имели возможности использовать среду в качестве вычислителя и индикатора результатов вычислений обращенного поля источника. Мы располагали только приемной вертикальной антенной, которая не могла излучать записанные сигналы. Излучение велось с дрейфующего судна. Соответствующей приемной антенны, которая бы была установлена в месте излучения сигнала и могла бы фиксировать результат вычисления обращенного сигнала, у нас тоже не было.

Это вынудило нас для вычисления обращенного поля использовать компьютер [1, 2]. Авторы работ, в которых вместо компьютера использовалась среда, не использовали для вычисления компьютер. Почему? Дело в том, что по принятому

полю с помощью компьютера можно вычислить обращенное поле лишь в одной точке по глубине [1]. Для вычисления поля на других глубинах в опыте нет данных, и поэтому нет уравнений для вычисления поля по всей глубине волновода.

Однако, если принятое поле представить не в виде отдельных точек, распределенных по глубине, а в виде мод волновода, то положение изменится. В этом случае обращенное поле может быть точно математически вычислено за исключением всего одного параметра. Путем вычислений не удастся определить точную глубину первоначального излучателя. Этот параметр приходится брать непосредственно из условий опыта или просто назначать [2]. Для использования этого приема надо уметь представлять поле в волноводе в виде суммы мод.

В этом заключается значение исследования сигналов мод волновода, что объясняет наш интерес к модовым сигналам волновода и попытки определения параметров этих мод [11, 13, 14, 17, 18]. Эта проблема осложняется тем, что не было известно метода определения важнейшего параметра мод – их дисперсии – по результатам опыта, поставленного на слишком короткой дистанции [12]. В частности, для нашего опыта, согласно [12], необходимы дистанции, превышающие 100 км, а в нашем опыте они были на порядок меньше.

Однако мы нашли способ определения параметров мод на тех дистанциях и в тех условиях, которые были в поставленном нами опыте [11, 13–16]. Это позволило установить экспериментально форму частотной характеристики (ЧХ) сигнала моды волновода [11, 14]. Оказалось, что ЧХ сигнала моды реального волновода совпадает с теоретической формулой для ЧХ моды идеаль-

ного волновода (ИВ) с зеркальными абсолютно отражающими стенками, среда которого однородна (волновода Пекериса). Это кажется на первый взгляд весьма удивительным, так как реальный волновод зеркальными стенками отнюдь не обладает, его дно неровное и среда внутри волновода неоднородна. В этой среде есть градиент скорости звука по глубине, существенно влияющий на распространение сигналов в нем. Однако это явление можно понять, так как ЧХ сигнала отдельной моды волновода чисто фазовая. Она определяет дисперсию, т.е. зависимость фазы сигналов от их частоты. Физический механизм образования такой дисперсии в волноводе состоит в том, что сигналы разных частот одной моды распространяются под различными углами. Этот физический механизм в данном случае единственный, так как в среде даже при наличии в ней градиента скорости звука дисперсия отсутствует. Следовательно, этот физический механизм образования дисперсии, определяющий вид ЧХ мод волновода, являясь общим как для реального волновода, так и для его математической модели, формирует ЧХ, описываемую формулой того же вида, что и теоретическая ЧХ. Эта общность формул так велика, что удается практически полностью вычлест сигнал моды реального волновода путем вычитания из общего сигнала математического представления вычитаемой моды с подобранным для этого единственным коэффициентом [11, 14].

Знание описывающей ЧХ сигналов мод реального волновода формулы и ее особые математические свойства позволили впервые представить все моды реального волновода сфокусированными (лишенными растяжения, вызванного дисперсией) в координатах “номер моды — групповое запаздывание” численным методом.

В настоящей статье рассказано как получено представление мод волновода, сфокусированными в координатах “номер моды — дисперсия моды” и показано как его можно использовать для исследования особенностей распространения сигналов мод в волноводе. Такое наглядное представление дало нам возможность увидеть, что реально в волноводе существуют два типа сигналов мод. Это сигналы мод, параметры которых близки к параметрам мод ИВ и значительно более интенсивные сигналы мод, которые образованы преобразованием сигнала одной единственной моды волновода с высоким номером. Это может являться особенностью именно того волновода в Баренцевом море, который нами исследовался. Однако метод, с помощью которого получен этот результат, является общим. Он может с успехом применяться и в других условиях, позволяя наглядно видеть, как распространяются сигналы мод волновода.

ФОКУСИРОВКА СИГНАЛОВ МОД ВОЛНОВОДА

В [11, 14] показано, что ЧХ сигналов мод реального волновода и ЧХ математической модели ИВ могут быть описаны общей для них математической формулой вида [14]:

$$Z(\omega, \Delta\tau) = \exp\left[i\frac{4\pi^2\Delta\tau}{\omega}\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right)^{-1}\right], \quad (1)$$

где ω — частота в радианах в секунду; $\Delta\tau$ — дисперсия в секундах. Отличия могут быть только в величине одного коэффициента дисперсии $\Delta\tau$. Этот коэффициент для математической модели определяется следующей формулой [14]:

$$\Delta\tau = Rcm^2 \frac{0.5}{4H^2} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right), \quad (2)$$

где $f_{1,2}$ — верхняя и нижняя частоты диапазона в Гц, по которым определяется разность времен группового запаздывания монохроматических сигналов на этих частотах или величина $\Delta\tau$; m — номер моды; R — дистанция; c — скорость звука; H — глубина волновода.

Наши опыты [1, 2, 11, 13–16] показывают, что ЧХ моды реального волновода во всех случаях описывается формулой (1). Однако далеко не во всех случаях при этом оказывается справедливой формула (2). Когда справедливо не только (1), а и (2), ЧХ моды волновода полностью соответствует теоретическому значению для идеального волновода. Если справедливо только (1), а соотношение (2) при этом не соблюдается, то в этом случае ЧХ моды реального волновода не соответствует теоретическому значению и возникает вопрос о физических механизмах, нарушающих соотношение (2). Чтобы определить, соблюдается или нет в реальном волноводе соотношение (2), надо при известных параметрах H , c , R независимо определить также m и $\Delta\tau$. Для измерения величины дисперсии моды в реальном сигнале надо с помощью вертикальной антенны выделить сигнал той m -й моды, дисперсия которой измеряется, и сфокусировать его.

Выделение моды осуществляется с помощью протяженной вертикальной антенны, сканирование которой, согласно [14], осуществляется по формуле:

$$F(\omega, m) = \sum_n T(\omega, n) \exp\left(i\pi \frac{d}{H} mn\right), \quad (3)$$

где n — номер приемного элемента вертикальной антенны; d — расстояние между приемными элементами антенны; $T(\omega, n)$ — спектр Фурье сигналов, принятых отдельными приемными элементами антенны.

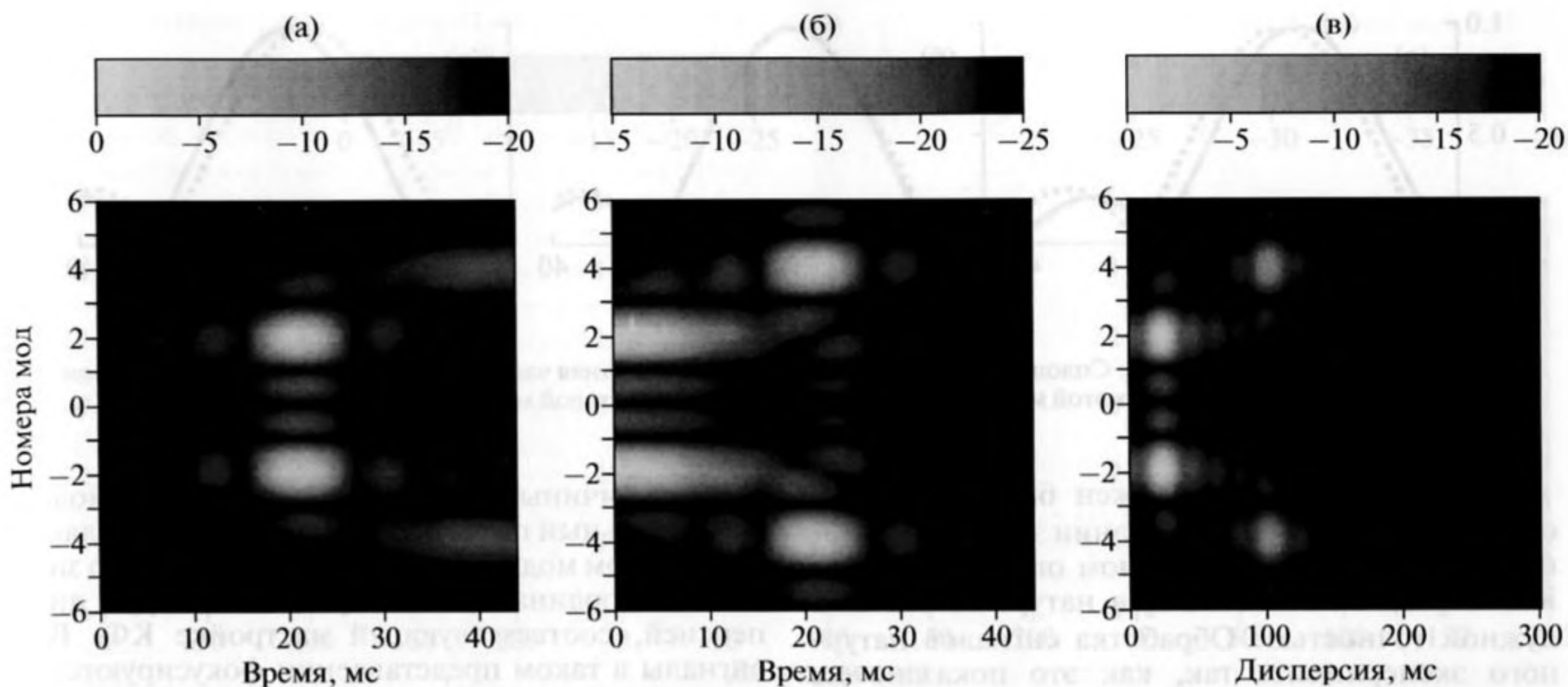


Рис. 1. Сигналы математической модели второй и четвертой мод при фокусировке второй моды (а); фокусировке четвертой моды (б); фокусировке всех мод сканированием по дисперсии КФ (в). Шкала яркости для (б) показана по отношению к максимуму сигнала (а).

Чтобы сфокусировать сигнал моды m_1 с дисперсией $\Delta\tau_1$ как для математической модели, так и для реального природного волновода, достаточно сигнал пропустить через фильтр с частотной характеристикой, обратной (1) и дисперсией $\Delta\tau_1$. Назовем такой фильтр компенсирующим фильтром (КФ). При этом сигнал моды m_1 сфокусируется, приняв вид первоначально посланного сигнала. У сфокусированного сигнала не будет никакой задержки во времени и он не будет искажен. Если исходный сигнал был импульсным, то и сфокусированный сигнал будет импульсом той же длительности. Если кроме сигнала моды с дисперсией $\Delta\tau_1$, которая фокусировалась, в сигнале присутствуют сигнал другой моды m_2 с дисперсией $\Delta\tau_2$ или сигнал той же моды с иной дисперсией, то этот сигнал не будет сфокусирован. Однако он будет задержан, так как разложение в ряд Тейлора экспоненты в (1) содержит и линейный член, который определяет задержку сигнала моды. В результате прохождения сигнала моды через фильтр КФ, компенсирующий дисперсию $\Delta\tau_1$, сигнал моды с дисперсией $\Delta\tau_2$ будет обладать дисперсией:

$$\Delta\tau_3 = \Delta\tau_2 - \Delta\tau_1.$$

Эта оставшаяся дисперсия приводит к сдвигу во времени сигнала моды с не скомпенсированной дисперсией относительно сигнала моды, в котором дисперсия полностью скомпенсирована. Благодаря сдвигу во времени величина сигнала моды m_2 в момент прихода неискаженного импульса сфокусированного сигнала моды m_1 будет

существенно меньше максимального значения сфокусированного сигнала моды m_2 . Если теперь изменить величину дисперсии КФ так, чтобы он компенсировал бы дисперсию сигнала моды m_2 , то этот сигнал примет форму исходного импульса в тот же момент времени t_0 , в который эту форму принимал сигнал моды m_1 , когда он был сфокусирован. После этого сигнал моды m_1 будет задержан и его значение в момент t_0 будет меньше максимального значения. Совпадением времен появления любых сфокусированных сигналов можно воспользоваться для того, чтобы получить сфокусированные сигналы всех мод. Для этого следует регистрировать значения сигналов мод только в момент t_0 , соответствующий максимальному значению сфокусированных сигналов, а КФ придавать последовательно возрастающие значения $\Delta\tau$, начиная с нуля. Тогда каждому текущему значению $\Delta\tau$ будет в момент t_0 соответствовать значение величины сфокусированного сигнала, обладающего исходным значением дисперсии $\Delta\tau$.

Эту процедуру для суммы двух мод с номерами 2 и 4 иллюстрирует рис. 1. Вдоль вертикали на рисунке показаны значения номеров мод, полученных по формуле (3). Сигналы этих мод показаны сфокусированными поочередно (а, б) в виде функций времени. Из рис. 1 видно, что сигналы как второй, так и четвертой мод фокусируются в одно и то же время t_0 . В то же время уровень сигнала моды, которая не сфокусирована в момент t_0 , незначителен ввиду того, что основной сигнал не сфокусированной моды смещен по времени относительно момента t_0 .

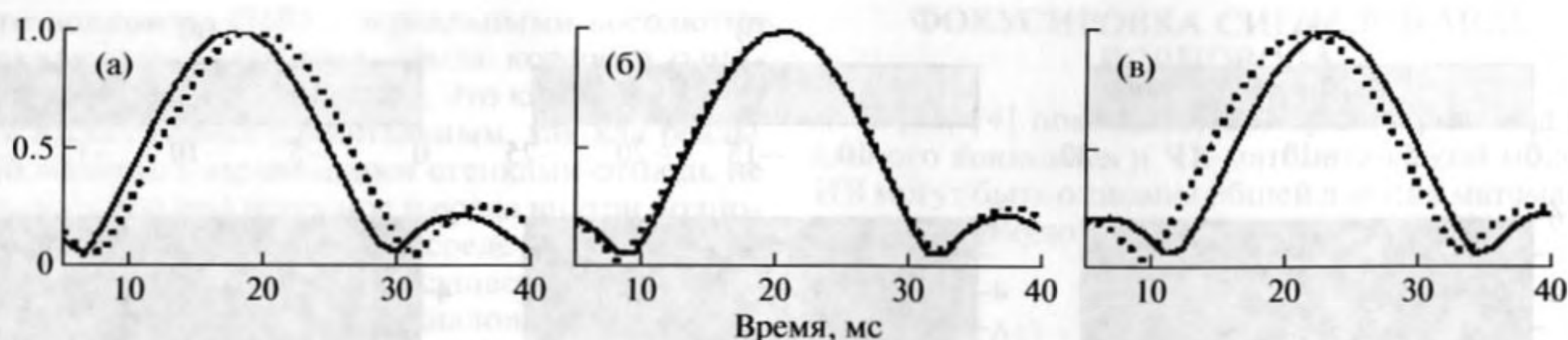


Рис. 2. Определение времени t_0 . Сплошной линией показана низкочастотная часть сигнала второй моды. Пунктиром показана высокочастотная часть этой моды. КФ настроен на дисперсию второй моды +2.5 мс (а); +0 мс (б); -2.5 мс (в).

Момент времени t_0 должен быть определен очень точно. При моделировании этот момент известен, а в реальном натурном опыте этого нет. Как определить момент t_0 в натурном опыте с нужной точностью? Обработка сигналов натурального эксперимента так, как это показано на рис. 1в, при котором сигналы всех мод сфокусированы, возможна только при положительном ответе на этот вопрос. Ответ на него можно получить следующим путем. Так как сигналы всех мод фокусируются точно в момент t_0 , то для определения этого момента целесообразно воспользоваться наиболее сильным сигналом любой моды. Выделим сигнал этой моды посредством процедуры (3), а далее разобьем выделенный сигнал на два самостоятельных сигнала по их спектрам. Один сигнал будет содержать частоты, которые выше некоторой границы раздела. Этот сигнал назовем высокочастотным (ВЧ), а оставшийся сигнал назовем низкочастотным (НЧ). Оба сигнала, как ВЧ, так и НЧ, фокусируются при соответствующей настройке КФ в одно время. При настройке КФ, отличающейся от фокусирующей, оба сигнала ВЧ и НЧ смещаются друг относительно друга, так как спектры у них различны. Максимумы осциллограммы сигналов ВЧ и НЧ совпадут только при точной фокусировке, а положение этих совпавших максимумов покажет искомое значение величины t_0 , так как эти максимумы появятся именно в этот момент.

Описанный метод иллюстрирует рис. 2, построенный для того же сигнала математической модели (рис. 1). Взят наибольший сигнал второй моды, который выделен с помощью процедуры (3), и из которого по спектру выделены сигналы ВЧ и НЧ. На рисунке показано, как эти сигналы совпадают при точной компенсации дисперсии, и как они разделяются при отстройке всего на 2.5 мс от точной компенсации, составляющей в данном случае 25 мс.

Вышеописанный способ представления сфокусированными сигналами всех мод использован ниже при исследовании особенностей структуры мод реального волновода. Картины мод в этом случае представлены в виде функции номера мо-

ды и величины дисперсии КФ. Сигнал моды, максимальный по этим двум параметрам, является сигналом моды номера, соответствующего значению координаты максимума по номеру с дисперсией, соответствующей настройке КФ. Все сигналы в таком представлении фокусируются в один момент времени t_0 , для которого они и показаны.

СИГНАЛЫ МОД ВОЛНОВОДА

Условия проведения опыта были следующие. В море глубиной 120 м была установлена вертикальная приемная антенна, состоящая из 32 приемных элементов, расположенных эквидистантно с шагом в 3 м на длине 93 м. Сигналы с элементов антенны непрерывно в течение всего опыта регистрировались в цифровом представлении. Судно в дрейфе излучало с интервалом в 1 мин широкополосные (90–280 Гц) импульсные линейно модулированные по частоте (ЛЧМ) сигналы длительностью около 5 с.

Картина сигналов мод в реальном волноводе при распространении волны на расстояниях 7 км и 10.5 км показана на рис. 3. На этом же рисунке приведен пример картины шумов в динамическом диапазоне от -25 дБ до -40 дБ относительно максимального сигнала на 10.5 км.

На рис. 3 вдоль вертикали показаны номера мод, выделенные вертикальной антенной. Она, согласно (3), выделяет направления прихода моды определенного номера на каждой частоте диапазона частот [14]. Дисперсия в сигналах мод компенсируется. В результате сигнал моды, в котором скомпенсирована дисперсия, возрастает по амплитуде до своего максимума точно в момент времени, одинаковый для мод любого номера. Фиксация сигнала для этого момента показана на рис. 3. Значение дисперсии, использованной для компенсации, отложено вдоль горизонтали. Видно, что сигналы мод скомпенсированы без дисперсии, а их значения разнесены по дисперсии. В то же время имеет место сильное отличие картины сигналов мод реального волновода от картины сигналов мод волновода Пекериса. Для

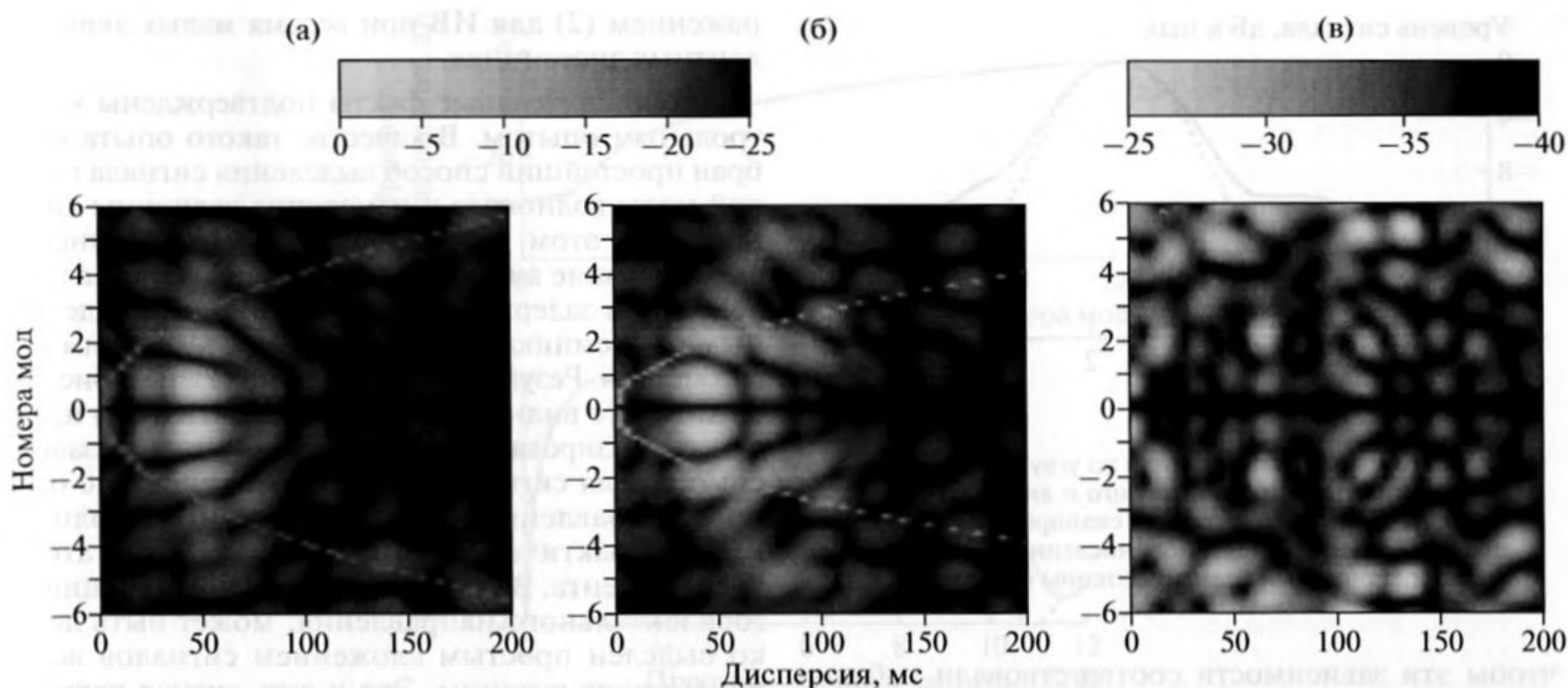


Рис. 3. Сигналы, принятые вертикальной антенной с дистанции 7 км (а) и 10.5 км (б) в момент времени прихода импульса с компенсированной дисперсией, представленные в виде сигналов мод волновода с нанесенными пунктирными белыми линиями зависимости дисперсии от номера моды (2) для ИВ. Шкалы яркости на (а, б) приведены в дБ к максимальному значению каждого сигнала. На (в) показан сигнал, принятый с дистанции 10.5 км на 0.2 с позже (шум), обработанный точно также, как сигналы на (а, б). Шкала яркости (в) нормирована на максимум (б).

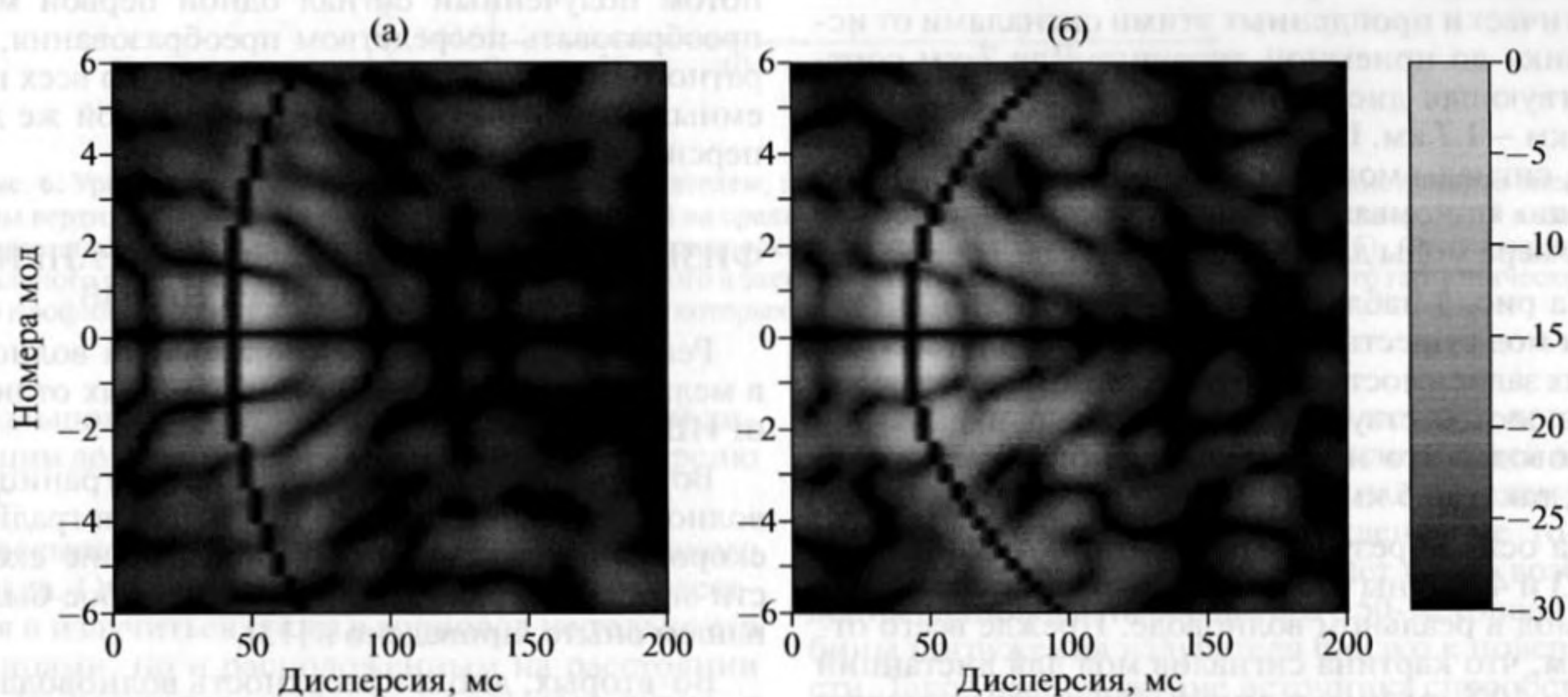


Рис. 4. Теоретическая зависимость дисперсии от номера моды (2) для дистанции 800 м (а) и 1700 м (б) в виде темных линий на фоне картины мод для дистанции 7 км (а) и 10.5 км (б).

сравнения на картину мод волновода нанесена зависимость дисперсии от номера моды, рассчитанная по формуле (2), справедливой для ИВ. Из рис. 3 видно, что на дистанциях 7 км и 10.5 км есть сигналы мод, номера и дисперсии которых соответствуют координатам ИВ. Это сигналы 1 моды на обоих рисунках, а также сигналы четко выделяемых мод с номерами 4.5 и 5.5 на дистанции 7 км, и с номерами 3.7 и 4.8 на дистанции 10.5 км.

Остальные сигналы мод в большом числе и гораздо большего уровня формуле (2) не удовлетворяют и, следовательно, не являются сигналами мод ИВ, стационарно распространяющимися в исследуемом волноводе.

Для сравнения сигналов мод с сигналами мод волновода Пекериса (рис. 3), на них на рис. 4 нанесены зависимости величины дисперсии от номера моды, построенные по алгоритму (2) так,

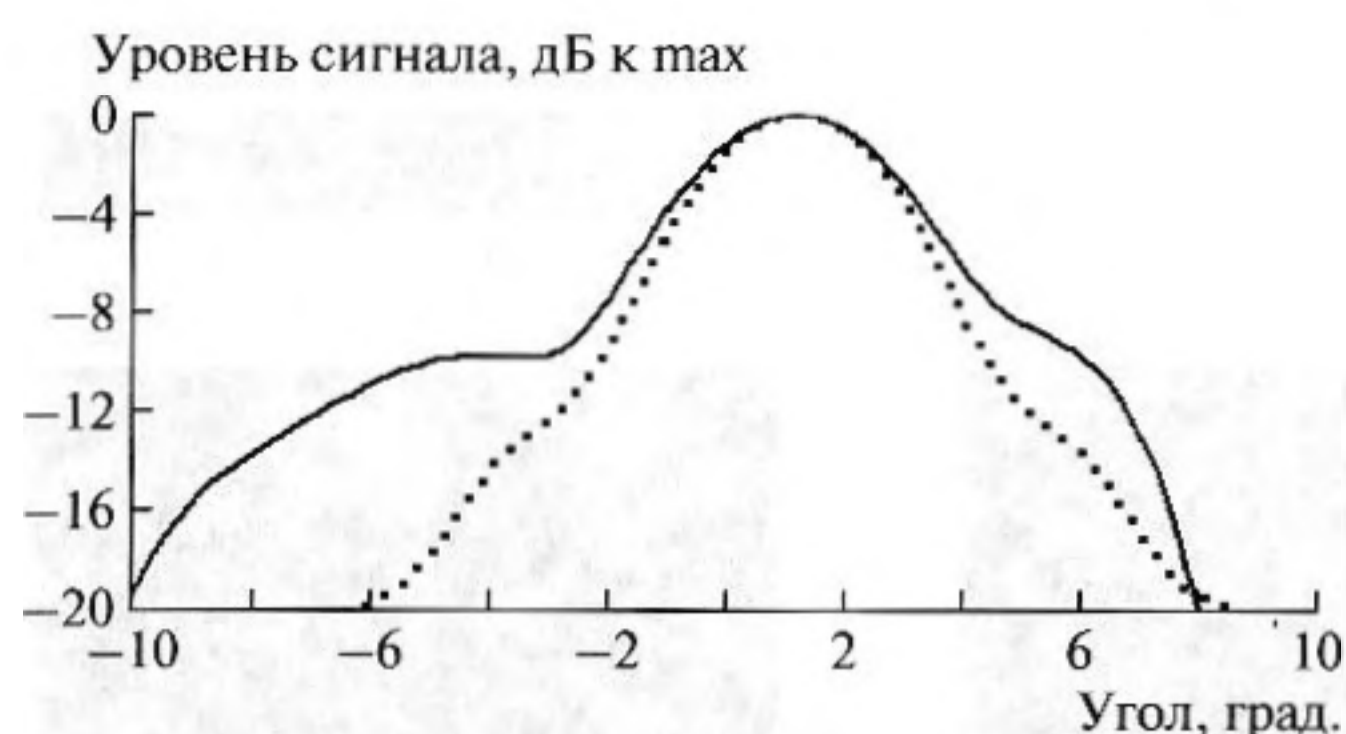


Рис. 5. Результат сканирования по углу вертикальной антенной сигнала, принимаемого с дистанции 7 км (сплошная линия) и результат сканирования той же антенной сигнала, введенного численно одинаковым в каждый приемный элемент антенны (пунктир).

чтобы эти зависимости соответствовали наблюдаемым интенсивным сигналам мод реального волновода. Для этого пришлось сместить эти линии на постоянную величину 48 мс и, кроме того, в формуле (2) подобрать значение дистанции. При этом получилось, что сигналы мод реального волновода хорошо соответствуют математической модели для расстояний, много меньших фактически пройденных этими сигналами от источника до приемной антенны. Для 7 км соответствующая дистанция составила 800 м, а для 10.5 км — 1.7 км. При этих параметрах, введенных в (2), сигналы мод реального волновода довольно хорошо описываются зависимостью дисперсии от номера моды для ИВ.

На рис. 3 наблюдаются также отдельные сигналы мод существенно меньшего уровня, для которых зависимость дисперсии от номера моды хорошо соответствует (2) для реальных параметров волновода. Это наблюдается как для дистанции 7 км, так и 10.5 км.

На основе результатов опыта, показанных на рис. 3 и 4, видны следующие особенности сигналов мод в реальном волноводе. Прежде всего отметим, что картина сигналов мод для дистанций 7 км и 10.5 км имеют много общего и их можно сравнивать между собой. Существует некоторая постоянная дисперсия довольно существенного уровня 48 мс, с которой фактически начинается распространение сигналов, обладающих наибольшими значениями уровней. Значения этой постоянной дисперсии для дистанций 7 и 10.5 км почти совпадают. Сигналом наибольшего уровня на обеих дистанциях является сигнал первой моды, который характеризуется большим значением дисперсии (48 мс) по сравнению с оценкой, определяемой формулой (2). Значения дисперсий в этих сигналах от номера моды зависят весьма слабо. Зависимость дисперсии от номера высших мод волновода хорошо описывается вы-

ражением (2) для ИВ при весьма малых эквивалентных дистанциях.

Это удивительные факты подтверждены контрольным опытом. В качестве такого опыта выбран простейший способ выделения сигнала первой моды волновода и измерение величины дисперсии в этом сигнале. Для этого выполнено сканирование антенны по углу вдоль вертикали с введением задержек сигналов, принятых отдельными приемниками антенны, с последующим их сложением. Результат обработки показан на рис. 5, из которого видно, что антенна практически идеально сфазирована. Теоретическая угловая зависимость для сигнала, принимаемого точно с одного направления (сигнал первой моды волновода), практически совпадает с результатом эксперимента. Видно, что сигнал, приходящий с горизонтального направления, может быть легко выделен простым сложением сигналов всех приемников антенны. Это и есть сигнал первой моды волновода, выделенной по углу ее прихода. Такая простейшая обработка сигнала совпадает с тем, что следует из (3) для выделения первой моды. Остается определить величину дисперсии в этом сигнале. Это сделано способом [14]: если выделить сигнал первой моды посредством (3), а потом полученный сигнал одной первой моды преобразовать посредством преобразования, обратного (3), то полученные сигналы во всех приемных элементах обладают одной и той же дисперсией 48 мс.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Реальный акустический природный волновод в мелком море имеет два существенных отличия от ИВ.

Во-первых, реальная среда между границами волновода неоднородна. В ней имеется градиент скорости звука. Реальное распределение скорости звука по глубине волновода, которое было в нашем опыте, приведено в [13].

Во-вторых, дно и поверхность волновода являются неровными. Эти неровности могут не только зеркально отражать падающие на них волны, а и рассеивать их в различных направлениях [18–20], что может приводить к возбуждению новых мод.

При построении физической модели распространения сигналов учтем оба эти отличия.

Начнем со второго отличия. Учитывая такую возможность, можно попытаться объяснить появление сигналов первой моды с дисперсией высшей моды в опытах на 7 км и 10.5 км тем, что эти сигналы образованы путем рассеяния шероховатой границей волновода сигнала высокой моды [18–20]. Это должна быть именно мода достаточ-

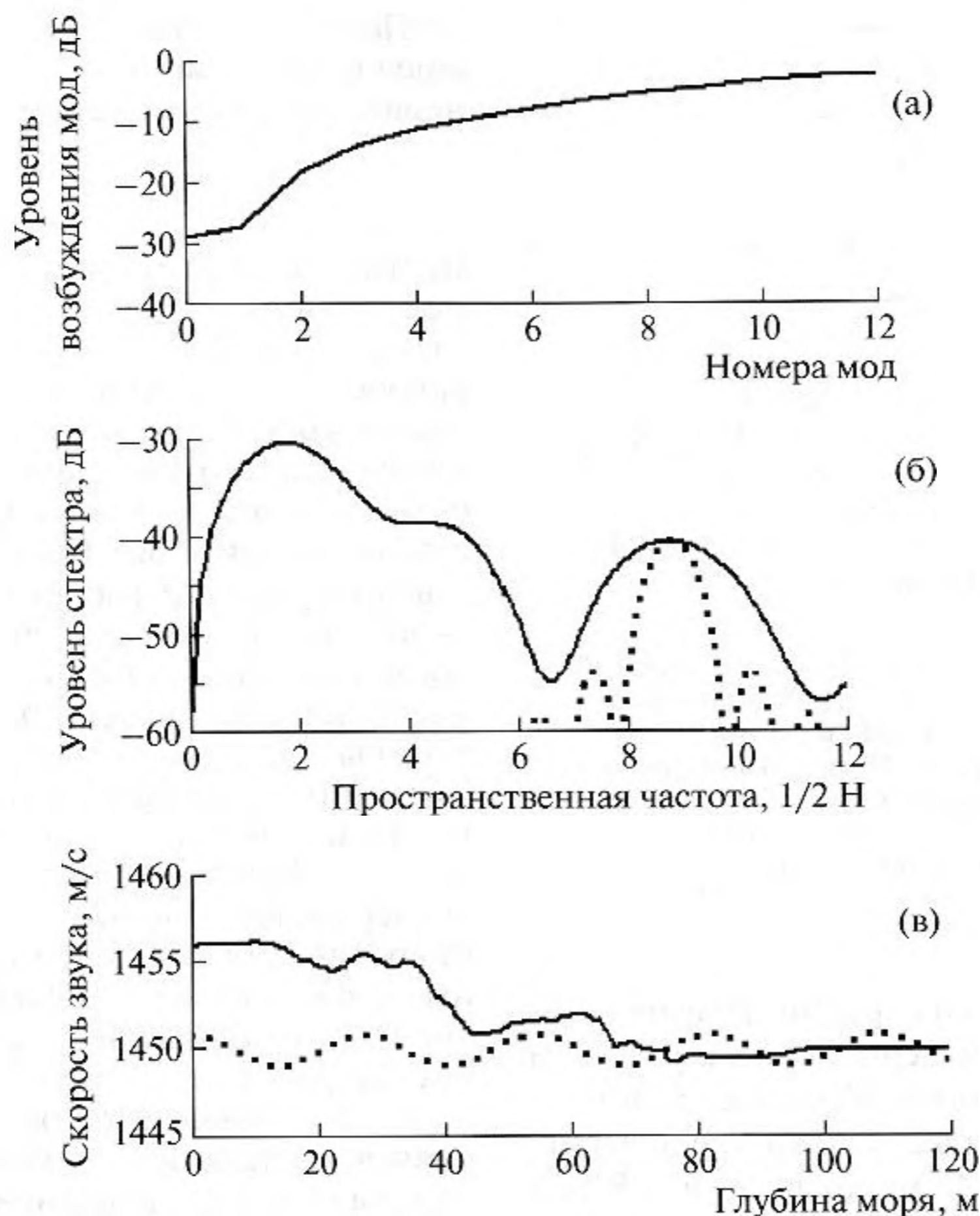


Рис. 6. Уровень возбуждения мод волновода излучателем, погруженным на глубину 3 м (а). Пространственные спектры вертикального распределения нормированной на среднее значение (1450 м/с) скорости звука, измеренной в эксперименте (сплошная линия), и модельного гармонического профиля скорости звука (пунктир) (б). Форма вертикального распределения скорости звука, измеренного в эксперименте (сплошная линия) и модельного гармонического профиля скорости звука (пунктир) (в), спектры которых показаны на (б).

но большого номера, набравшая на короткой дистанции до своего рассеяния большую дисперсию 48 мс.

Рассмотрим возможность возбуждения такого сигнала. Она появляется, если сигнал мог рассеяться и излучиться снова в волновод не только его границами, но и расположенным на расстоянии 50 м от излучателя корпусом большого судна, с борта которого он опущен. Такое излучение большими телами, механически связанными с мало излучающим источником колебаний, приводящее к существенному повышению уровня излучения звука источником колебаний, в акустике хорошо известно. Примером этого является известное с глубокой древности усиление звука струнных музыкальных инструментов корпусом этих инструментов или декой рояля. Похожее явление имеет место и в современных акустических системах (громкоговорителях), в которых излучение увеличивается во много раз диффузорами больших размеров. Достаточно убрать диффузор и звук акустической системы будет совсем не

слышен. Акустически мягкий корпус корабля вполне мог играть роль такой усиливающей деки, акустически жестко связанной с излучателем тонким слоем воды. Такое возбуждение не только усиливает излучение, а и изменяет место возбуждения волновода, переводя его с 50-метровой глубины погружения излучателя близко к поверхности. Такое расположение источника способствует возбуждению преимущественно сигналов высших мод волновода, как показано на рис. 6а. Расчет выполнен по формулам [12] для возбуждения волновода Пекериса при жестком дне [14]. При дискретном источнике, расположенном близко к поверхности, хорошо возбуждаются высшие моды. Излучатель, опущенный с борта корабля на 50 м, возбуждает первую моду, а также и высшие моды, но его излучение пренебрежимо мало сравнительно с излучением корпуса судна.

Есть возможность сравнить уровни сигналов первой моды, образованной из одной высшей моды и той же моды, излученной в среду. У этих мод различная дисперсия, позволяющая их отделить

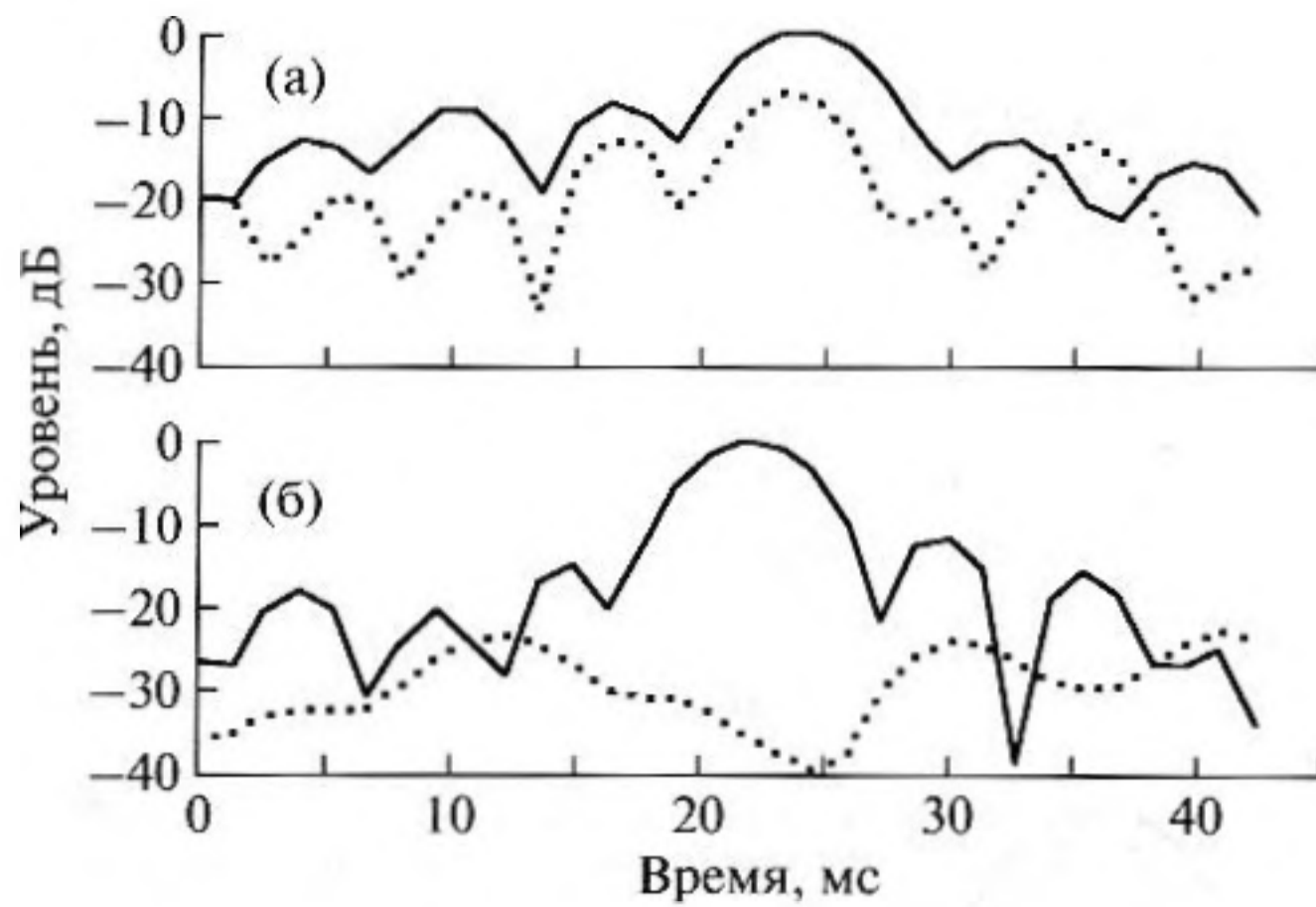


Рис. 7. Сигналы в опыте на 7 км (а) и математической модели ИВ (б). Сплошная линия — результат выделения сильного сигнала первой моды по углу фильтром, компенсирующим дисперсию 48 мс (а) и в сигнале 1-й моды (б). Пунктиром показан результат, полученный после вычитания сильного сигнала со всеми его боковыми лепестками и компенсации дисперсии 12 мс (а).

друг от друга и измерять их уровни. Результат такого сравнения уровней первых мод с разными значениями дисперсий показан на рис. 7. Для такого сравнения пришлось сначала выделить сигнал моды с дисперсией 48 мс посредством КФ, а затем этот сигнал полностью убрать с помощью того же фильтра, как это описано в [14]. На рис. 7, используя математическую модель сигнала ИВ, показана эффективность такого вычитания сигнала с известной величиной дисперсии. Как видно, после прохождения дистанции уровень первой моды вновь образованного сигнала увеличился на 7 дБ.

Однако наблюдаемый вновь образованный сигнал вряд ли мог образоваться путем рассеяния сигнала высшей моды неровностями дна. Рассеяние поверхностью, расположенной горизонтально, не приводит к понижению номера моды волновода. Такое рассеяние на структуре с любым периодом смещает угол распространения сигнала моды на величину, не зависящую от частоты. Это происходит в силу того, что горизонтально ориентированная структура периода d воспринимается модой как структура периода $2Hd/m\lambda$, а смещение угла определяется той же длиной волны λ . В результате λ входит и в числитель, и в знаменатель формулы, определяющей смещение сигнала m -й моды при длине волны λ , которая при этом сокращается. Кроме того, рассеяние неровностями дна не является достаточно селективным, чтобы выделить только одну моду с ярко выраженным значением дисперсии.

Понизить номер моды может только вертикально ориентированная структура, обладающая периодом, равным периоду моды:

$$d = \frac{2H}{m}. \quad (4)$$

Вертикальная структура с периодом (4) переводит моду номера m в первую моду на всех частотах. Но где взять такую структуру? Обратимся к градиенту скорости звука, приведенному в [13] и показанному на рис. 6в. Этот градиент невелик. Он нигде не превышает 0.5%. Однако этот градиент обладает некоторой пространственной частотой, что отражено на рис. 6б. На нем показан пространственный спектр распределения относительной скорости звука $\Delta c/c$ вдоль вертикали для случая, когда при отражении от поверхности фаза изменяется на π . Там же для сравнения показан спектр модельного гармонического профиля скорости звука того же уровня и частоты. Этот модельный профиль показан на рис. 6в вместе с вертикальным профилем скорости звука, измеренным в эксперименте. Видно, что отклонения скорости от среднего значения с амплитудой 0.9 м/с заметны на фоне градиента скорости звука. Если градиент, показанный на рисунке, оказывает влияние на форму сигналов мод, то и его периодическая составляющая такого уровня должна на это влиять, а влияние периодической структуры с периодом 8.9 моды волновода способно именно эту моду преобразовать в первую моду того же волновода. Такая возможность принципиально существует и ее можно высказать в качестве гипотезы, объясняющей появление первой моды с высокой дисперсией. Значение дисперсии 48 мс высокая мода способна набрать на пути длиной всего 0.5 км.

Осталось объяснить малое изменение величины дисперсии в сигналах вновь образованных мод с расстоянием.

Итак, начальная высокая дисперсия в сигналах после 7 км и 10.5 км образуется благодаря дифракции высокой моды на периодической структуре, образованной градиентом скорости звука. При этом образуется не только первая мода, а и ряд высших мод. Все они образовались из одного сигнала моды и имеют при образовании одинаковые дисперсии. Далее эти сигналы распространяются обычным образом в волноводе и их дисперсия должна нарастать с увеличением дистанции и номера моды. Однако этого не происходит. Дисперсия нарастает по закону ИВ, но значительно медленнее. Почему?

Дальнейшее распространение сигнала — это процесс прохождения сигналом последовательно через два фильтра. Первый фильтр — общий для всех сигналов и прохождения через него создает начальное значение дисперсии. Второй фильтр индивидуален для каждой моды, возникающий в

волноводе. Этот фильтр индивидуален для каждого сигнала моды. В результате прохождения через два фильтра результирующая ЧХ будет следующей:

$$Z(\omega) = \exp\left(i\frac{m_1^2}{\omega} R_1 b\right) \exp\left(i\frac{m_2^2}{\omega} R_2 b\right) = \\ = \exp\left(i\frac{m_1^2 R_1 + m_2^2 R_2}{\omega} b\right).$$

Здесь выделены номер m моды, дистанция R , частота ω ; все остальные параметры входят в постоянную b . Получившийся суммарный волновод обладает ЧХ со средними параметрами.

В результате видны только параметры суммарного волновода, а отдельных слагаемых не наблюдаются, за исключением, может быть, самого первого фильтра, который для всех одинаков, и его параметром является начальное значение дисперсии. Параметры второго фильтра не видны. Поэтому номер его моды, обозначенный m_2 , является неизвестной величиной. Мы видим номер моды только в сигнале, который уже прошел все два фильтра и его номер получается в виде:

$$m^2 = \frac{m_1^2 R_1 + m_2^2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Этот номер, согласно (5), получается в точности таким, который объясняет величину получившейся дисперсии в сигнале. Никаких противоречий не остается. Только этот номер не тот, который мы видим на картинке мод.

Номер моды m_2 , в которую переходит дифрагированная высокая мода, получается небольшим, а потому дисперсия так медленно нарастает. То, что этот номер небольшой, объясняет дифракцию моды. При небольшом номере m_2 получается, что мода рассеивается под очень малым углом. Это гораздо более правдоподобно, чем ее рассеивание в широкую угловую область.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общность вида ЧХ моды реального и идеального волноводов дает возможность найти и применить метод представления сигналов мод волновода сфокусированными и разнесенными по времени их группового запаздывания в среде. Благодаря этому получается возможность наглядного представления процесса распространения сигналов мод в реальном волноводе мелкого моря. Обсуждена не имеющая пока строгого обоснования гипотетическая физическая модель, которая объясняет некоторые наблюдаемые явления, в частности, несоответствие величин дисперсий номерам мод и медленное нарастание дисперсии в отдельных модах. Локализация мод, достигнутая предложенным методом, позволяет

определять параметры основных распространяющихся мод для описания распространения сигналов и вычисления обращенного поля в волноводе.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 08-02-00818) и региональным грантом РФФИ (проект 08-08-97054-р_поволжье_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Численное временное обращение волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 69–76.
2. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Модовое обращение волн, для мелкого моря // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 62–73.
3. Fink M., Cassereau D., Derode A., Prada C., Roux P., Tanter M., Thomas J.-L., Wu F. Time-reversed acoustics // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1933–1995.
4. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 685–693.
5. Hodgkiss W.S., Song H.C., Kuperman W.A., Akal T., Ferla C., 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.
6. Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Edelmann G., Akal T. Echo-to-Reverberation enhancement using a time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 115. P. 1525–1531.
7. Song H.C., Kim S., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A. Environmentally adaptive reverberation nulling using a time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 116. P. 762–768.
8. Song H.C., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A., Roux P., Akal T., Stevenson M. Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 118. P. 1381–1387.
9. Prada C., Julien de Rosny, Clorennec D., Minonzio J.-G., Aubry A., Fink M., Berniere L., Billand P., Hibrat S., Folegot T. Experimental detection and focusing in shallow water by decomposition of the time reversal operator // J. Acoust. Soc. Amer. 2007. V. 122 (2). P. 761–768.
10. Sabra K.G., Roux P., Song H.-C., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A., Akal T., Stevenson J.M. Experimental demonstration of iterative time-reversed reverberation focusing in a rough waveguide application to target detection // J. Acoust. Soc. Amer. 2006. V. 120. P. 1305–1314.
11. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Выделение мод в мелком море путем их обращения // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 6. С. 754–761.
12. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
13. 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.
14. Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Стромков А.А. Измерение параметров моды реального

- волновода // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 230–244.
15. *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.
 16. *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. 220–226.
 17. *Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А.* Пространственная протяженность области акустического обращения волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 823–830.
 18. *Исакович М.А.* Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // ЖТФ.1952. Т. 23. С. 305–312.
 19. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
 20. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.