

ВЫДЕЛЕНИЕ МОД В МЕЛКОМ МОРЕ ПУТЕМ ИХ ОБРАЩЕНИЯ

© 2009 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 20.05.08 г.

По сигналам отдельных приемных элементов путем их обращения с использованием частотной характеристики плоской волны выделены моды волновода. Распределение мод на плоскости “время прихода – номер моды” в опыте соответствует математической модели идеального волновода, отличаясь тем, что высшие моды опережают низшие. Предложена модификация частотной характеристики, устраняющая это несоответствие, связанная с зависимостью эффективной глубины волновода от частоты. В результате предложен и опробован способ определения дальности до излучателя и дана интерпретация помехоустойчивости приема сигналов с использованием обращения. Опыт выполнен в Баренцевом море на глубинах порядка 100 метров и дистанциях 7, 10.5 и 12 км с помощью сигнала в диапазоне частот 100–300 Гц.

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

Исследованию распространения волн в сложных акустических условиях мелкого моря посвящено большое количество работ, приведенных, например, в [1]. Перспективным считается использование возможностей определения параметров среды и увеличение помехоустойчивости приема за счет обращения широкополосных сигналов [2–16]. В [2] для увеличения помехоустойчивости принимаемых сигналов предложен метод численного обращения с использованием информации о среде. Рецензент уже в положительном заключении на [2] сделал замечание, что предлагаемый метод повышения помехоустойчивости приема работать фактически не будет ввиду того, что параметры среды существенно изменяются со временем. Для того чтобы понять, как меняются условия распространения от параметров среды, надо иметь надежный инструмент для анализа характеристик распространения, в том числе для анализа модового состава поля. Настоящая статья посвящена этому вопросу.

При обращении волн в мелком море, совершаемом путем излучения обращенных во времени принятых сигналов [9–16], задача получения параметров среды не может быть решена. При численном обращении волн [2–5] можно получить частотную характеристику (ЧХ) среды на отдельных модах волновода (ЧХМ). Однако для того, чтобы эта характеристика соответствовала реальной, в алгоритме для ее получения необходимо использовать истинную форму мод волновода. При разложении волнового поля по каким-то иным функциям, как это делалось в упомянутых выше работах, результаты будут некорректны, хотя они могут быть использованы для других це-

лей, в частности, для обращения волнового поля [3]. В настоящей работе предлагается метод, основанный на выделении и численном обращении отдельных мод, который без задания их формы позволяет получить информацию об истинной частотной характеристике волновода.

Для этого необходимо уметь выделять моды волновода без анализа пространственного распределения поля и приписывания им какой-либо формы, как это сделано в [7, 8]. Метод выделения отдельных мод волновода, не использующий форму мод и возможностей вертикальной антенной решетки, подробно рассмотрен в монографии [1] как теоретически, так и в реальном эксперименте. Идея метода основана на том, что сигнал в различных модах распространяется с различными групповыми скоростями. Этим предлагается воспользоваться для разделения мод по времени прихода импульса на разных частотах с достаточно узким спектром сигналов на каждой частоте. Узкий спектр импульса необходимо использовать, чтобы минимизировать его расплывание, вызванное внутримодовой дисперсией групповой скорости в волноводе. Как показано в [1], метод требует значительных дистанций. В условиях мелкого моря, в которых выполнялся опыт [2–8], результаты которого используются в настоящей статье, дистанция должна быть больше 100 км. Для меньших дистанций в [6] была успешно применена другая методика. Она состояла, как и в [1], в использовании разницы дисперсий групповой скорости распространения сигналов на разных модах волновода, но, в отличие от [1], дисперсия при этом компенсировалась. Для этой цели использовалась корреляция принятого сигнала с

исходным широкополосным сигналом, в который была введена дисперсия волновода на основе группового запаздывания мод [1] в модели Пеке-риса. В настоящей работе этот метод развивается и используется для сравнения результатов опыта с математической моделью волновода.

В нашем опыте вертикальная приемная антенна, состоящая из 32 приемных элементов, расположенных эквидистантно 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 дрейфовало, излучая широкополосный (100 Гц – 300 Гц) импульсный сигнал, линейно модулированный по частоте длительностью около 5 с. Корабль, на котором был установлен излучатель, дрейфовал, в то время как приемная антенна была стационарно установлена на дне. Поэтому имелась возможность получать сигналы приемной антенны с различных расстояний.

Из опыта нам известен комплексный спектр волнового поля $u_n(\omega)$, принятого приемником номера n на частоте ω . Зная форму комплексного спектра посланного сигнала $a(\omega)$, можно вычислить сигнал, принятый приемником в той же среде при посылке любого иного сигнала из точки j . Например, сигнал, получающийся в виде отклика на импульсный (дельта) сигнал, будет:

$$w_n(\omega) = \frac{u_n(\omega)}{a(\omega)} = \frac{ZS_{j=s,n}(\omega)a(\omega)}{a(\omega)}, \quad (1)$$

где $ZS_{j,n}(\omega)$ – ЧХ среды между точками среды j и n . Нас будет интересовать отклик на короткий импульс, обладающий спектром $b(\omega)$, равным 1 в пределах ширины полосы спектра фактически посланного сигнала $a(\omega)$ по уровню 0.7 от максимума. Спектр такого импульсного сигнала $b(\omega)$ вычисляется посредством формулы:

$$b(\omega) = \frac{a(\omega)a^*(\omega)}{|a(\omega)|^2} F(\omega) = F(\omega), \quad (2)$$

где знак (*) означает комплексное сопряжение; $F(\omega)$ – множитель, ограничивающий полосу частот, равный 1 в пределах полосы пропускания и 0 вне ее.

Для выделения отдельных мод волновода методом, использованным в [6], нам потребуется представить сигнал, принятый отдельным приемником антенны в виде суммы плоских волн (ПВ). Разложение сигнала по ПВ можно сделать на основе различий в фазовых скоростях ПВ разных направлений распространения, располагая сигналом, принятым в точке. Для того чтобы этим воспользоваться, надо получить вид ЧХ ПВ в зависимости от α – угла ее распространения. Для этого заметим, что распространение ПВ между двумя дискретными точками может быть описано как прохождение сигнала через линейный фильтр

[17]. Отклик линейного устройства на входное воздействие в виде $\exp(i\omega t)$, где t – время, будет $z(\omega)\exp(i\omega t)$ [17], $z(\omega)$ – комплексная частотная характеристика. Согласно этому, ЧХ плоской волны, распространяющейся в среде под углом α между точками, лежащими на одной глубине, имеющей вид $\exp(i\omega t - kR\cos\alpha)$ будет:

$$Z(\omega) = \exp(ikR\cos(\alpha)). \quad (3)$$

Аналогичным путем можно получить ЧХ ПВ для точек, находящихся на различных глубинах. Для этой цели в (3) угол α следует изменить, заменив его на больший или меньший угол. При этом для получения ЧХ ПВ в пределах нахождения точек приема и излучения внутри водного слоя, изменение величины угла будет не более, чем H/R , где H – глубина водного слоя, а R – расстояние между точками. Легко показать, что такое изменение величины α приводит к добавлению в (3) постоянной фазы, несколько не изменяя при этом частотной зависимости, которая нас интересует. Поэтому можно утверждать, что (3) описывает ЧХ ПВ между любыми двумя точками волновода, отстоящими на расстояние R . Это для нас очень существенно.

Мода волновода представляет собою сумму двух ПВ, углы распространения которых подобраны так, чтобы удовлетворять граничным условиям на дне и поверхности волновода. Рассмотрим сначала волновод с мягким дном. В таком волноводе моды представляются в виде ПВ, распространяющихся под углами:

$$\sin(\alpha) = \pm \frac{\lambda}{2H} m,$$

где λ – длина волны; m – номер моды. Для выявления мод путем разложения сигнала по ПВ нам вполне достаточно выполнить такое разложение только по положительным углам, так как разложение по отрицательным углам будет симметричным. Поэтому найдем ЧХ ПВ для положительных направлений распространения. Учитывая (3), ЧХ ПВ можно записать в виде:

$$ZPM(m, \omega) = \exp(ik \cos(\alpha) R). \quad (4)$$

Для низких номеров мод при большом числе распространяющихся мод углы $\alpha \ll 1$ и можно в (4) разложить косинус в степенной ряд, ограничившись двумя первыми членами разложения. Первый член разложения представляет собой ЧХ задержки сигнала на время $t = r/c$, где c – скорость звука. Эту составляющую ЧХ можно опустить. ЧХ с учетом только второго члена разложения в ряд косинуса примет вид:

$$ZMP(m, \omega) = \exp\left(i \frac{Rc\pi^2}{2H^2\omega} m^2\right). \quad (5)$$

ЧХ ПВ, соответствующей моде волновода (5), полностью соответствует приведенному в [1] в том же приближении групповому запаздыванию сигнала моды волновода, которое получается из (5)

путем дифференцирования по частоте. Если дно волновода мягкое, то m в (5) является целым числом. Если дно обладает некоторым импедансом, то угол распространения плоской волны, соответствующей моде волновода, будет иным [1, 6]. Так как импеданс дна нам неизвестен, то мы, следуя [6], будем считать величину m дробной и будем изменять ее с шагом в 0.1.

Для сигнала ПВ в пределах положительных углов ЧХ получается вида (5). Это, в отличие от распространения сигнала со всей антенны через среду, процесс одномерный.

Для нас существенно другое отличие. Для строгого описания поля надо знать такие параметры среды и ее границ, которые обычно недоступны или труднодоступны для наблюдения. Поэтому процесс распространения сигнала, излученного всей антенной, математически строго описать нельзя. Однако можно практически осуществить полное обращение сигнала путем посылки сигналов антенны, обращенных во времени, в ту же самую среду. Сигнал ПВ, принятый не всей антенной, а одним приемником антенны, можно математически точно обратить, пропустив его через фильтр с ЧХ обратной (5) или, учитывая вид (5), через фильтр с частотной характеристикой комплексно сопряженной (5). В то же время, посредством излучения в среду сигнала этого гидрофона обратить его отдельные ПВ нельзя.

Таким образом, задачу обращения сигнала моды во времени и ее фокусировки можно решить только численно путем моделирования распространения сигнала ПВ с помощью фильтра с частотной характеристикой, комплексно сопряженной (5). Возможность реального осуществления такого преобразования основана на том, что этот фильтр имеет всего один параметр в виде множителя:

$$b = \frac{m^2 c R}{H^2}, \quad (6)$$

который легко подобрать путем перебора возможных его значений.

Для выделения моды путем обращения следует применить фильтр, обратный (5). Для этого спектр сигнала приемника (2) надо умножить на комплексно-сопряженную ЧХ (5):

$$F_n(m, \omega) = w_n(\omega) ZMP^*(m, \omega). \quad (7)$$

В (7) введена зависимость от номера моды m . Тем самым введен перебор всех возможных значений параметра (6).

В результате преобразования (7) выделяются не моды волновода, а отдельные ПВ. Моды волновода выделяются при компенсации влияния параметра b (6). Компенсация влияния этого параметра представляет собой процедуру обращения сигнала моды, приведения сигнала к точке, находящейся в волноводе в исходной плоскости волны, распространяющейся под углом Бриллюэна. В том случае, если исходный сигнал был в виде короткого

импульса, операция по его обращению приводит к его сжатию во времени с увеличением его амплитуды. Этим можно воспользоваться для того, чтобы подобрать значение параметра b , от которого зависит волноводная дисперсия.

Искомое обращение ПВ получим после обратного преобразования Фурье (8) по переменной ω . Результат этого преобразования показывается в яркостном виде вдоль горизонтали для различных значений дробного номера моды m , изменяющегося с шагом 0.1, значения которых показываются вдоль вертикали. Тем самым подбирается нужный параметр b (6). Полученная в результате такого преобразования трехмерная картина позволяет по максимумам амплитуд сигналов видеть интересующие нас ПВ, для которых значения (6) соответствуют модам волновода.

Преобразование (7) дает возможность не только наблюдать ПВ и определять величины m , а и выделять их в виде отдельных сигналов. Для этого надо в полученной картине определить значение аргумента времени, соответствующее выбранному значению m . После этого следует использовать значение комплексного числа в обратном преобразовании Фурье (7) для выбранного значения времени, положив все остальные значения равными нулю. С полученной таким образом функцией времени, в которой только одно значение, а все остальные равны нулю, следует совершить преобразования, обратные тем, которые использовались для получения обратного преобразования Фурье (7). После прямого преобразования Фурье мы получим спектр обращенной отдельной ПВ, эквивалентный выражению (7) для всего сигнала. Чтобы получить спектр сигнала выделенной одной моды без ее обращения, следует полученную функцию поделить на комплексно сопряженную ЧХ (5) или умножить просто на ЧХ (5), учитывая, что для этой функции обратная величина совпадает с комплексно сопряженным значением.

На рис. 1 показаны осциллограммы исходного сигнала, из которого будем выделять ПВ и моды волновода. Показана осциллограмма всего линейно модулированного по частоте (ЛЧМ) импульса. Показана также осциллограмма короткого импульсного сигнала, полученного путем преобразования исходного ЛЧМ импульса по формулам (1)–(2). Все дальнейшие исследования проводились с короткими импульсными сигналами.

На рис. 2 показана реальная часть частотной характеристики моды, определяемой (5). Эта функция используется для диагностики и выделения мод из сигналов, осциллограммы которых показаны на рис. 1.

Результаты, которые получаются в результате обратного преобразования Фурье (7), показаны на рис. 3. На рисунке показаны модули сигналов, представленных в аналитическом виде. Действительные сигналы преобразуются в комплексные

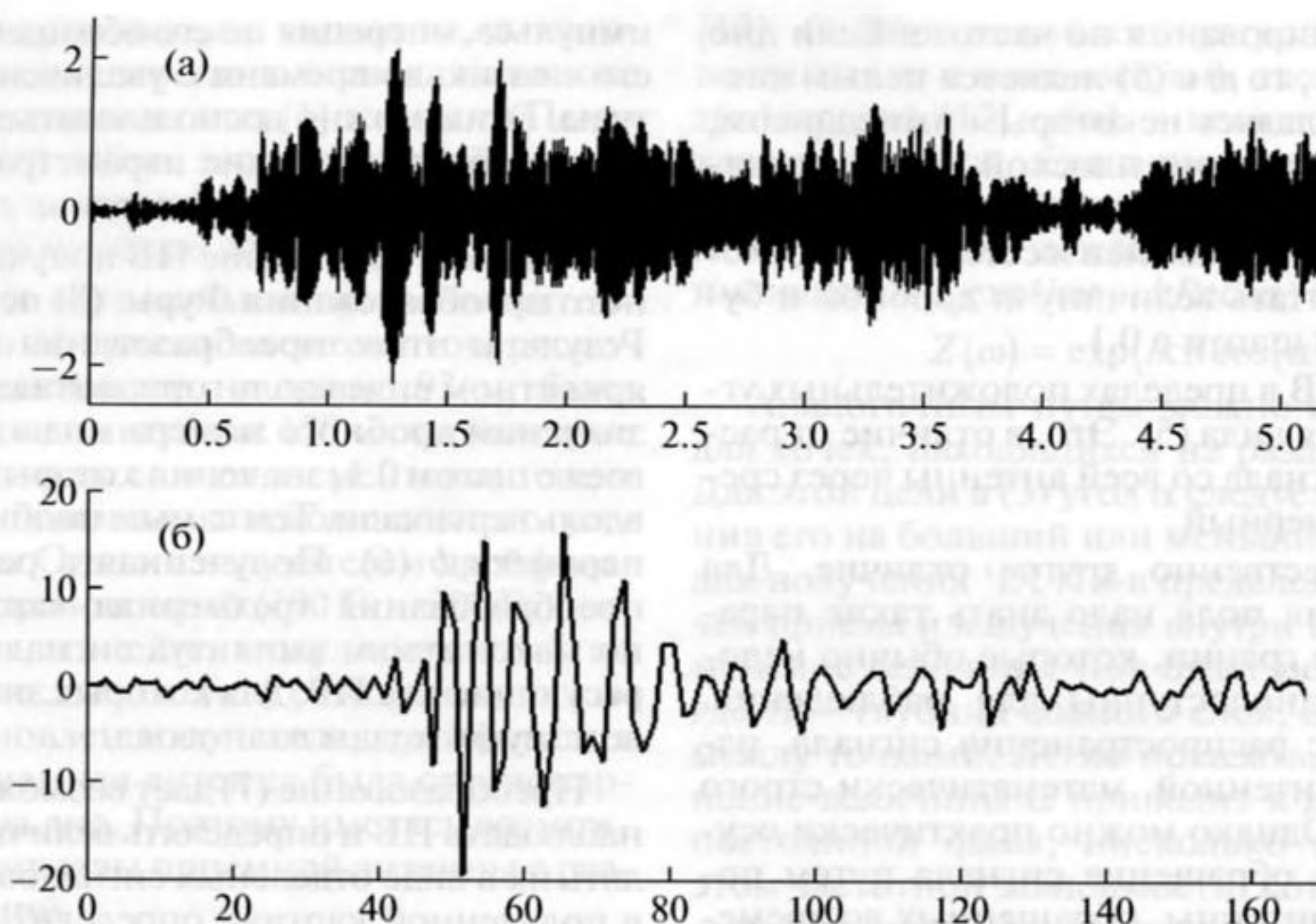


Рис. 1. Осциллограммы исходных сигналов. На (а) сигнал, принятый приемником антенны, на глубине 90 м и дистанции 7 км. Вдоль горизонтали время в с. На (б) тот же сигнал, преобразованный по формуле (2) в импульс. Вдоль горизонтали время в мс.

путем искусственного обращения в нуль (7) (являющегося спектром) на половине частот. После этого сигнал, получаемый обратным преобразованием Фурье, становится комплексным, в котором мнимая и действительная части связаны преобразованием Гильберта. Действительная часть полученного комплексного сигнала представляет собою сам действительный сигнал, а модуль комплексного сигнала представляет его амплитуду. Таким образом, в виде модулей представлены на рисунках все вычисленные сигналы. Такое представление позволяет исключить несущую частоту сигнала, которая не несет информации об амплитуде сигнала, а показывает положение его спектра.

Как видно из рис. 3, процедура обращения ПВ полностью снимает расплывание сигнала, вызванное дисперсией групповой скорости волн в волноводе, позволяя видеть все ПВ сфокусированными. То, что при таком преобразовании мы действи-

тельно наблюдаем сигналы мод волновода, видно по тому, что зависимость от m — номера моды — получилась дискретной. Математическая процедура обращения ПВ эквивалентна корреляции сигнала отдельного приемника антенны и импульсной характеристики среды на отдельной моде [10]. В [6] тоже применялась корреляция отклика волновода на сигнал с самим сигналом в зависимости от дробного номера моды. Однако в [6] эта операция выполнялась только для одного момента времени. Эта операция соответствует разрезу графиков на рис. 3 вдоль вертикали. Как и отмечено в [6], сфокусировать все моды можно только в том случае, если они принимают максимальное значение в один момент времени. Это справедливо для математической модели, но, как видно из рис. 3 и из последующего рассмотрения, для условий опыта это несправедливо. На рис. 3 мы видим, что ПВ, соответствующие разным модам волновода, фокусируются в разные моменты времени.

Сравнивая рис. 3 а с рис. 3 г, мы видим, что и в том, и в другом четко выделяются первая и вторая моды, но на рис. 3 а вторая мода сравнительно с рис. 3 г опережает первую примерно на 5 мс. В остальном модельный сигнал практически идентичен реальному сигналу. На этом же рисунке показаны результаты выделения отдельных мод волновода, которые анализировались точно так же, как и первоначальные сигналы. При этом была исключена задержка по времени.

На рис. 4 показаны результаты выделения сигналов ПВ, соответствующих первой и второй модам волновода из общего сигнала, принятого од-

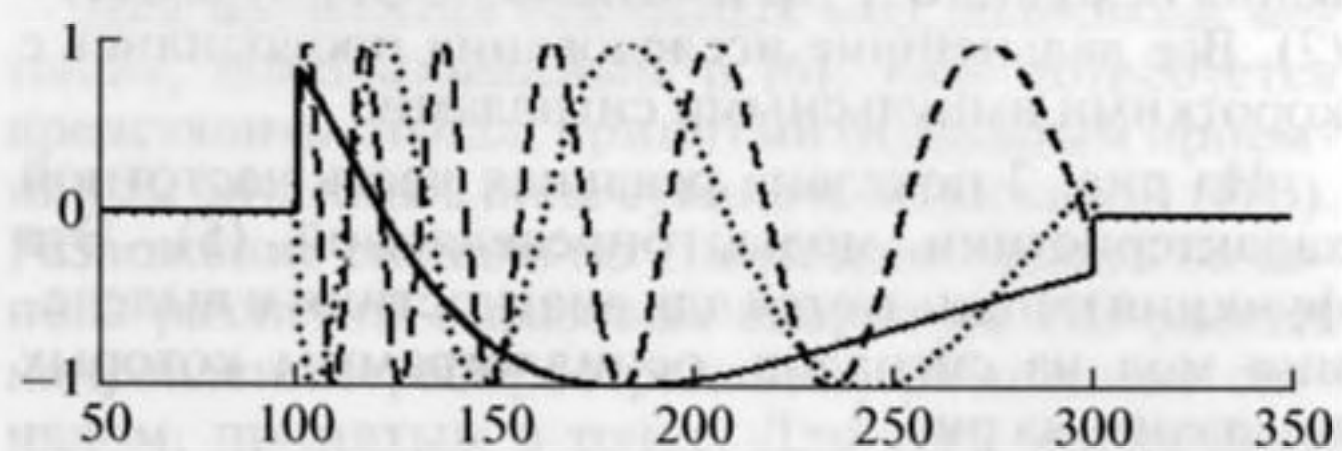


Рис. 2. Осциллограммы реальной части ЧХМ (3) для 1 моды (сплошная линия); 2 моды (мелкий пунктир); 3 моды (крупный пунктир) для дистанции 7 км и глубине волновода 120 м и мягкого дна. Вдоль горизонтали частота в Гц.

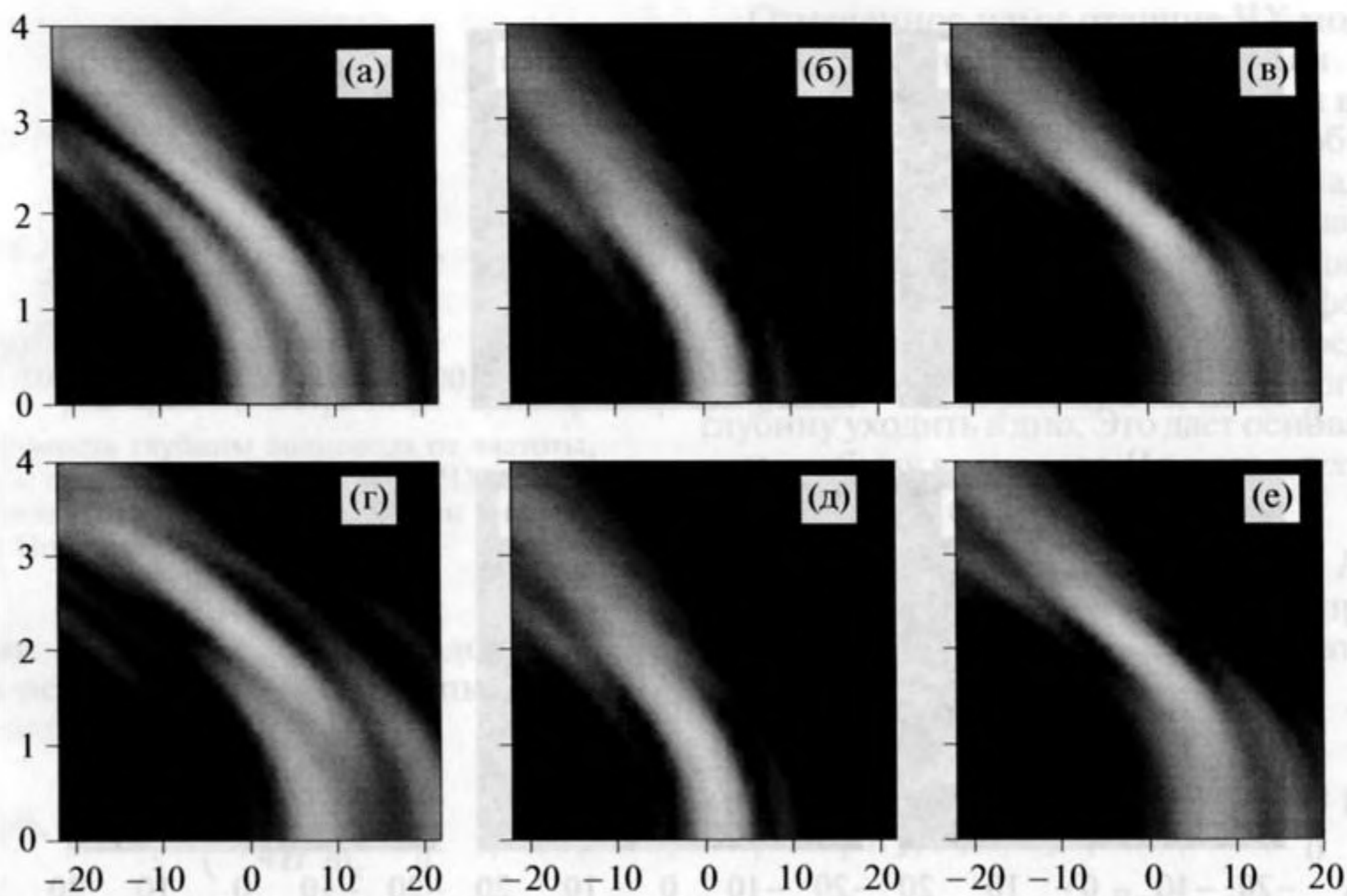


Рис. 3. Выделение и обращение мод из модельного сигнала в виде суммы двух первых мод (а, б, в) и реального сигнала, принятого на дистанции 7 км приемником на глубине 90 м (г, д, е). По вертикали номера мод. Вдоль горизонтали время в мсек. На “а” и “г” весь сигнал. На “б” и “д” выделенная 1-я мода. На “в”, “е” сигнал 2-й моды.

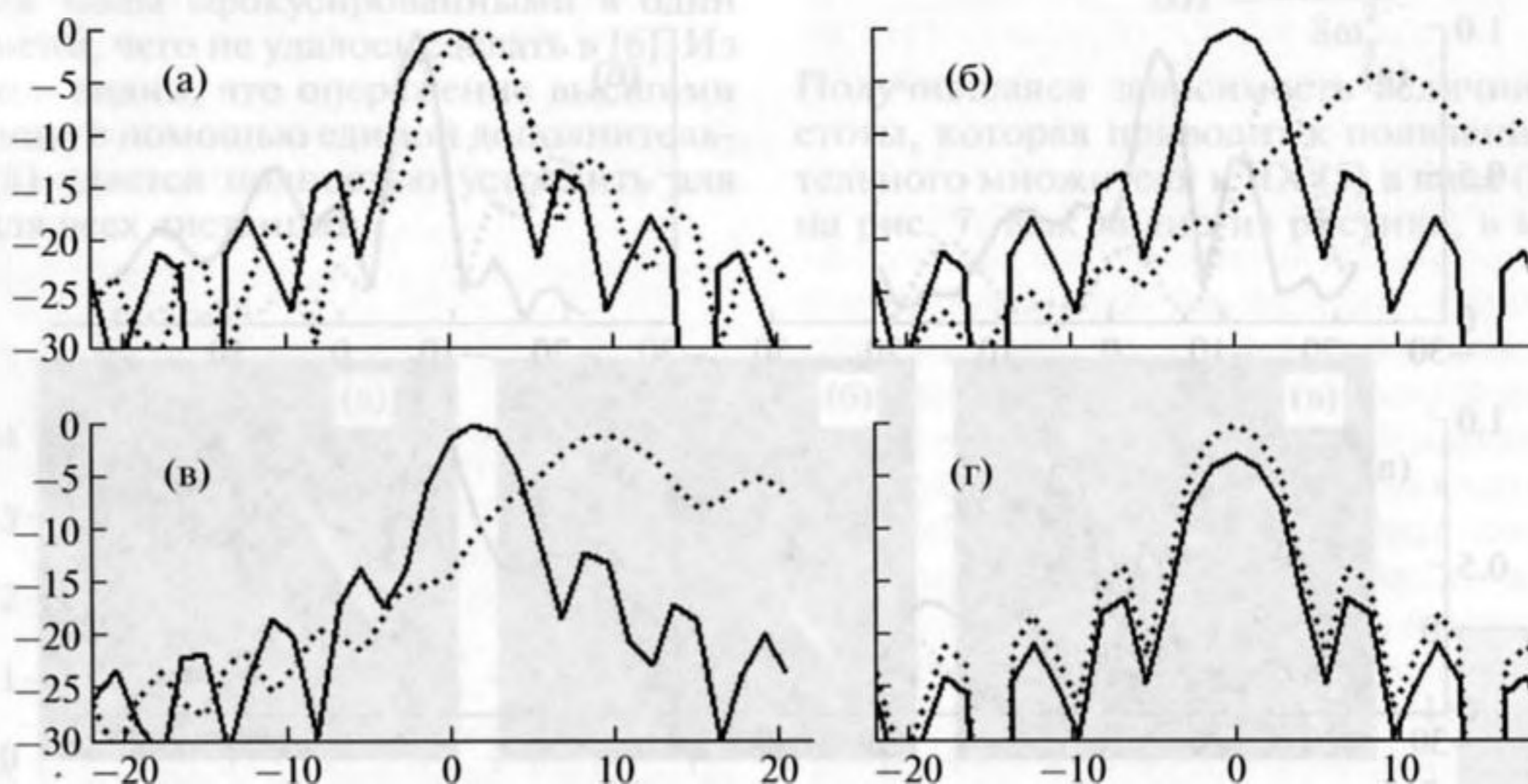


Рис. 4. Импульс, принятый приемником с дистанции 7 км, на отдельных модах волновода. В верхнем ряду (а, б) моды с обращением (сплошная линия) и без обращения (пунктир). Первая мода (а) и вторая мода (б). В нижнем ряду (в, г) первая мода (сплошная линия) и вторая мода (пунктир) без обращения (в) и с обращением (г). Вдоль горизонтали время в мс, вдоль вертикали уровень в дБ.

ним приемником. Из этого рисунка видно, что первая мода на данном расстоянии практически не расплывается из-за дисперсии, так как она распространяется под очень небольшим углом к оси волновода, а вторая мода расплывается весьма сильно. На этом рисунке четко видны и относительные амплитуды первой и второй мод. Вторая мода всего на несколько дБ превышает первую. Первая мода, фокусируясь, практически не изме-

няет при этом свой уровень, а вторая мода при фокусировке возрастает вполне заметно на 4 дБ.

На рис. 5 а, б, в (верхний ряд) показаны результаты обращения мод (как и на рис. 3 здесь показаны модули результатов обратного преобразования Фурье аналитических сигналов) для сигналов отдельных приемников для трех расстояний. На этих рисунках видны ПВ, соответствующие сигналам мод и заметно, что сигналы высших мод

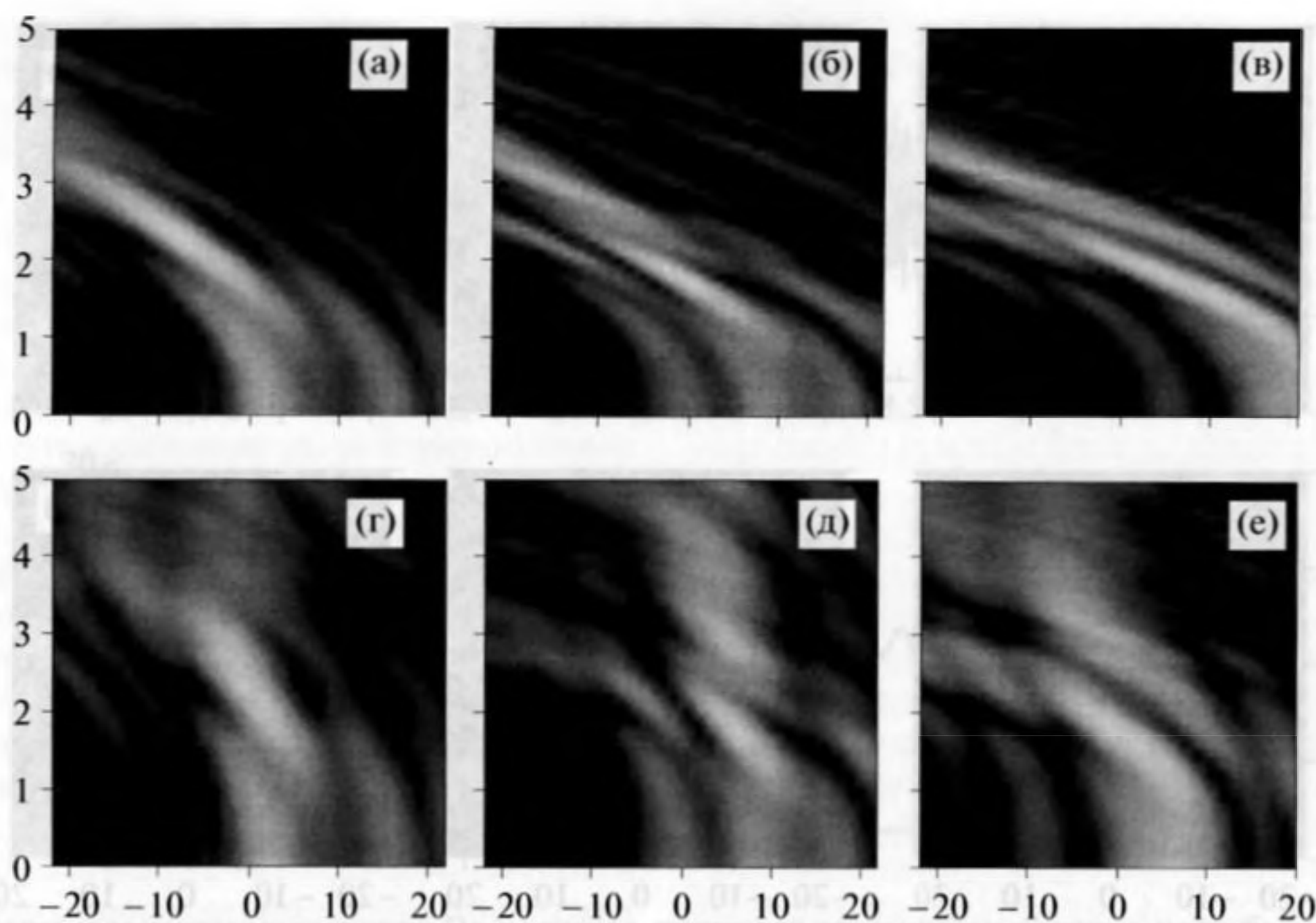


Рис. 5. Выделение мод в сигнале приемником на глубине 90 м на 7 км "а" и "г", 10.5 км "б" и "д" и 12 км "в" и "е". Верхний ряд "а", "б" и "в" обращение с ЧХМ (3). Нижний ряд "г", "д" и "е" с учетом дополнительной ЧХМ, компенсирующей опережение высших мод (4). Вдоль вертикали номера мод. Вдоль горизонтали время в мс.

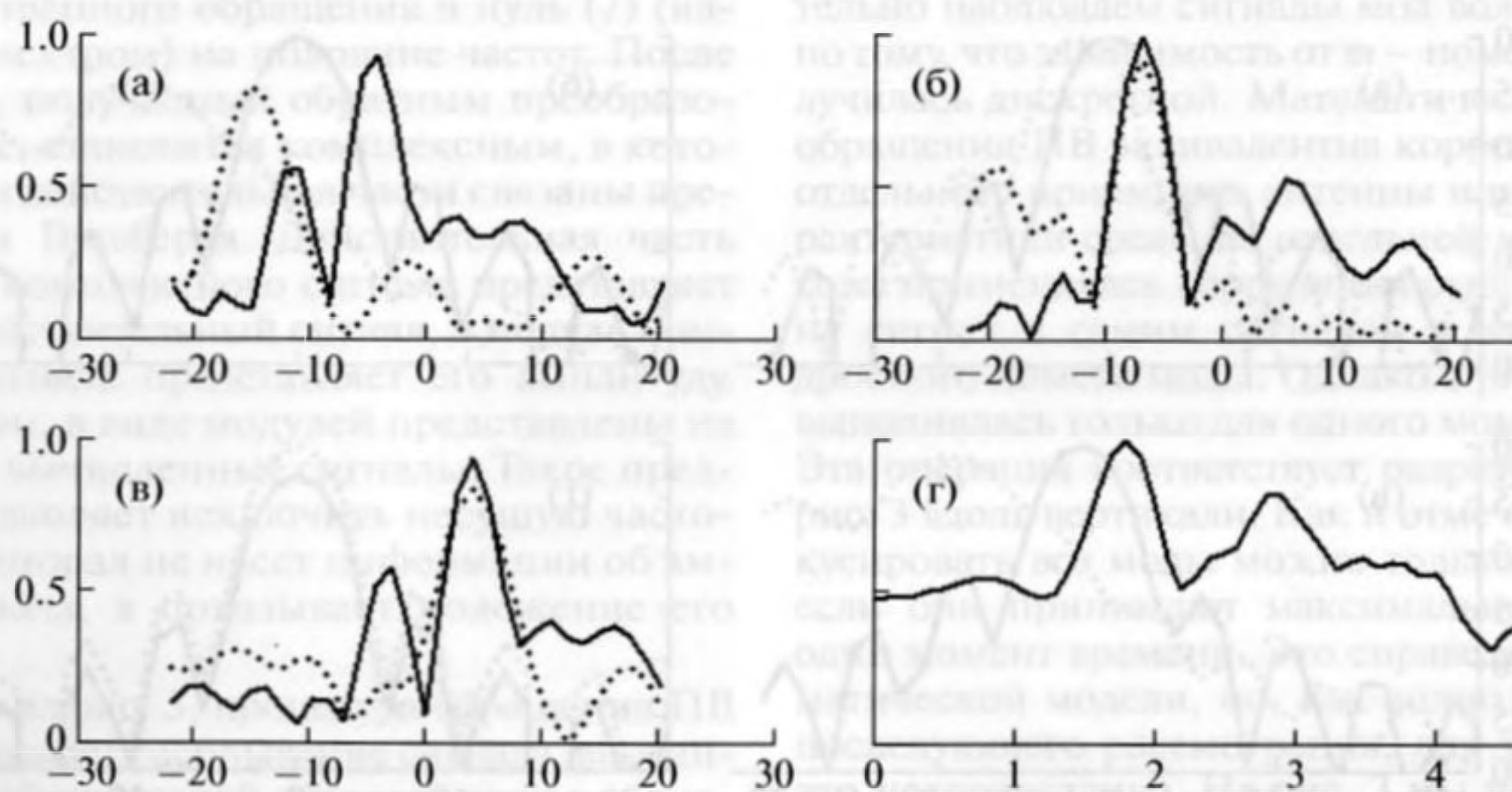


Рис. 6. Модули обращенных мод на глубине 45 м и дистанции 10.5 км. На а, б и в сплошной линией – вторая мода; пунктиром – третья. На а модули мод сигнала. На б те же моды в математической модели. На в модули мод с дополнительной ЧХМ (4). На г модули мод сигнала в один момент времени с дополнительной ЧХМ (4). Вдоль горизонтали на а, б и в время в мс. По горизонтали номера мод.

явно опережают сигналы мод низших. В математической модели такого эффекта нет. Это явление особенно заметно на рис. 6, на котором показаны выделенные вторая и третья моды. Из рис. 6 также видно, что форма модулей сигналов ПВ после их обращения практически совпадает с аналогичной формой ПВ математической модели. Это чрезвычайно существенно, так как доказывает, что ЧХ в натурном опыте по своему виду близка к (5). Опережение высших мод относительно низших явля-

ется существенным отличием картины обращенных мод в реальном опыте от математической модели. Это означает, что реальная среда имеет более сложную структуру своей ЧХ, которая не сводится целиком к ЧХ ПВ. ЧХ, использованную для обращения мод, можно подправить так, чтобы картина обращенных мод в реальном опыте полностью соответствовала бы математической модели волновода. Дополнительный множитель частотной характеристики (5), устраняющий опереже-

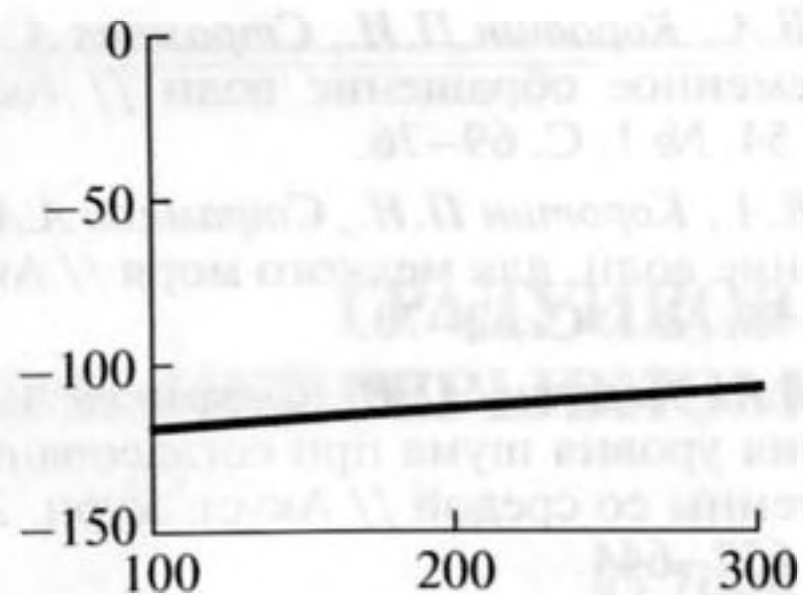


Рис. 7. Зависимость глубины волновода от частоты, приводящая к получению дополнения к ЧХМ (3) в виде множителя (5). Глубина по вертикали с обратным знаком. По горизонтали частота в Гц.

ние высшими модами низших, подобранный эмпирически исходя из результатов опыта, имеет следующий вид:

$$AM(m, \omega) = \exp\left(i\omega \frac{Rc\pi^2}{4H^2\omega_g^2} m^2\right), \quad (8)$$

где ω_g – среднее геометрическое из крайних частот диапазона.

Действие дополнительной ЧХ (8) на сигналы мод показано на рис. 5 г, д, е и на рис. 6. На рис. 6 показаны все моды сфокусированными в один момент времени, чего не удалось сделать в [6]. Из этих рисунков видно, что опережение высшими модами низших с помощью единой дополнительной ЧХМ (8) удастся полностью устранить для всех мод и для всех дистанций.

Отмеченное нами отличие ЧХ мод в реальном опыте и математической модели невозможно устранить путем любого изменения величины параметров, входящих в ЧХ (5). Чтобы правильно описать выявленные отличия ЧХ, надо предположить зависимость какого-либо из параметров ЧХ (5) от частоты. Из параметров, входящих в (6), от частоты может зависеть только эффективная глубина волновода H . Естественно представить, что волны низких и высоких частот могут на разную глубину уходить в дно. Это дает основание представить глубину волновода H в виде двух слагаемых:

$$H = H_0 + \Delta H.$$

Пусть ΔH зависит от частоты, а H_0 от частоты не зависит. Тогда для H^2 получим при малой поправке на член, зависящий от частоты:

$$H^2 = H_0^2 \left(1 + 2\frac{\Delta H}{H_0}\right). \quad (9)$$

Подставим (9) в (5) и, используя разложение в степенной ряд, получим:

$$ZMP(m, \omega) = \exp\left(i\frac{Rc\pi^2}{2H_0^2\omega} m^2 \left(1 - 2\frac{\Delta H}{H_0}\right)\right). \quad (10)$$

Теперь очевидно, что из сравнения (10) и (8):

$$\Delta H = -\frac{H_0\omega^2}{8\omega_g^2}.$$

Получившаяся зависимость величины H от частоты, которая приводит к появлению дополнительного множителя к ЧХ (5) в виде (8), показана на рис. 7. Как видно из рисунка, в исследуемом

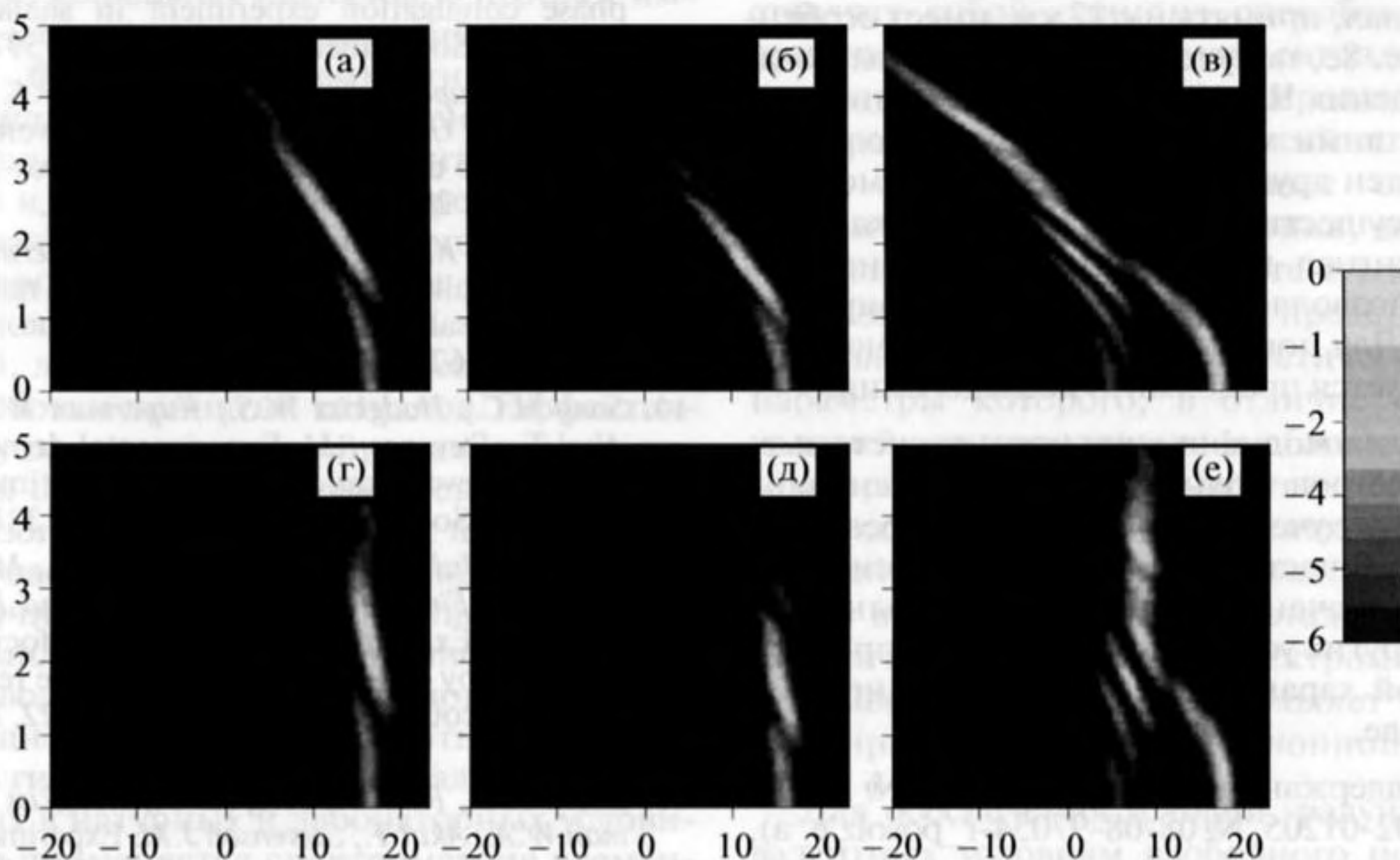


Рис. 8. Сигналы мод волновода, выделенные из когерентно суммированных сигналов всех приемников антенны. Верхний ряд (а, б, в) без использования дополнительной ЧХ (8). Нижний ряд (г, д, е) с ее использованием. Слева (а, г) дистанция 7 км; в центре (в, д) – 10.5 км.; справа (в, е) – 12 км. Вдоль горизонтали время в мсек. Вдоль вертикали номера мод. Масштаб по яркости логарифмический в пределах 5 дБ.

диапазоне частот глубина волновода H изменяется незначительно.

Таким образом, частотная характеристика среды содержит два фазовых множителя, один из которых, определяемый (5) с H_0 , стабилен и не может изменяться со временем. Этого нельзя с уверенностью сказать о втором сомножителе, определяемом (8). Результаты, полученные в [11], когда обращенное поле высокого качества определялось по частотной характеристике, измеренной за 10 дней до обращения, говорят о достаточно медленном изменении параметров среды. Таким образом, можно надеяться на то, что метод повышения помехоустойчивости приема сигналов в мелком море с использованием результатов численного обращения волн [2] будет иметь практическое значение.

Выше было отмечено, что ЧХ моды одинакова для всех приемников антенны. Поэтому можно компенсировать дисперсию и обратить моды не только в сигнале, принятом отдельным приемником антенны, а и в сумме сложенных когерентно сигналов всех приемников антенны. Результат обращения сигналов мод волновода для всей антенны показан на рис. 8 с двумя видами ЧХ моды волновода. В верхнем ряду показаны результаты, полученные при использовании ЧХ вида (5), а в нижнем ряду показан результат обращения тех же сигналов с частотной характеристикой, имеющей вид произведения (5) и (8). При этом сигналы, принятые антенной с расстояний 7 км и 10.5 км, не имеют никаких особенностей. На них четко видны 2 моды (первая и вторая), на них полностью устраняется опережение высшими модами низших. Сигнал, принятый с 12 км, имеет особенность. На рис. 8е, полученном путем использования произведения ЧХ (6) и (9), компенсация опережения высшими модами низших наблюдается, но явно заметен другой эффект. Сигналы мод выше 2 явно и существенно на время порядка 20 мс опережают сигнал первой моды. Примененный нами метод позволяет уверенно зарегистрировать это явление. Для поиска объяснения отмеченного явления требуется продолжить исследования.

Отметим, что модификация моды за счет изменения параметров волновода, предложенная в статье, не может учесть все особенности реального волновода. В частности, характер зависимости собственных значений от параметров волновода и частоты в других условиях может иметь принципиально иной характер, чем в модифицированном волноводе.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 08-02-00818, № 07-02-01205, № 08-08-97054-г_поволз'е_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М. Наука, 1997. 191 с.
2. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Численное временное обращение волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 69–76.
3. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Модовое обращение волн, для мелкого моря // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 62–73.
4. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Эффект снижения уровня шума при согласовании приемной антенны со средой // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 637–644.
5. Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А. Пространственная протяженность области акустического обращения волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 823–830.
6. 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.
7. 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.
8. 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. 784–790.
9. Fink M., Cassereau D., Derode A., Prada C., Roux P., Tanter M., Thomas J.-L. and Frané cois Wu. Time-reversed acoustics // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1933–1995.
10. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Зверев В.А. Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике). М.: Сов. Радио, 1975. 304 с.