

УДК 534.2

ДИСПЕРСИЯ СИГНАЛА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ
В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2009 г. И. Б. Есипов, О. Е. Попов, В. А. Воронин*, С. П. Тарасов*

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева**E-mail: ibesipov@akin.ru***Таганрогский технологический институт Южного федерального университета*

Поступила в редакцию 21.04.08 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования особенностей распространения широкополосного акустического сигнала параметрической антенны в мелком море. Высокая направленность излучения во всем диапазоне частот обеспечивала одномодовый режим возбуждения морского волновода. Обсуждается возможность сжатия широкополосного сигнала при его распространении в мелком море при специальном выборе режима частотной модуляции. Использование волноводной дисперсии приводит к повышению эффективности параметрического излучения в мелком море.

PACS: 43.25.LJ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время довольно активно обсуждаются методы, повышающие эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море. Одним из таких направлений является проблема фокусировки акустического излучения в морском волноводе [1, 2]. Причем эту проблему предпочитают решать методом обращения волнового фронта [3–5]. Считается, что пространственная фокусировка акустического излучения в толще волновода позволит снизить рассеяние на его границах и тем самым повысить соотношение между полезным сигналом и шумом, вызванным реверберацией. В то же время известны подходы, которые позволяют перенести известные принципы пространственной обработки сигналов в частотную область [6, 7]. В условиях мелкого моря эти подходы можно реализовать при одномодовом режиме возбуждения морского волновода в широкой полосе частот. Параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот [8] является одним из возможных акустических устройств, создающих условия для реализации этих подходов.

Особенностью такой гидроакустической антенны, действующей на принципах нелинейной акустики, является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (1° – 3° – характерная ширина диаграммы) для низкочастотных акустических сигналов. Ширина диаграммы параметрической

антенны практически постоянна в широкой полосе частот и не имеет боковых лепестков. Поэтому параметрическая антенна может обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала в морском волноводе. Зондирующий сигнал формируется в морской среде, которая возбуждается интенсивной высокочастотной акустической накачкой, модулированной по амплитуде. В результате в волноводе формируется антенна бегущей волны, которая генерирует остронаправленное излучение сигнала на частоте модуляции. Такой низкочастотный акустический сигнал, излученный параметрическим образом, будет далее распространяться независимо от высокочастотной накачки, которая быстро затухает. Благодаря нерезонансному способу генерации низкочастотного сигнала, параметрическая антенна обеспечивает излучение зондирующих сигналов в широкой полосе частот (более чем 2 октавы).

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и толщины волновода [9]. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно протяженные расстояния, либо к концентрации энергии акустического сигнала в коротком интервале времени, если частная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В та-

ком случае можно говорить о фокусировке или сжатии акустического сигнала во времени [10]. В настоящей работе исследуется возможность фокусировки во времени (компрессии) широкополосного акустического сигнала, распространяющегося в мелководном морском волноводе. Акустический сигнал возбуждался остронаправленной параметрической антенной.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования выполнялись летом в Таганрогском заливе Азовского моря на двух маломерных судах. На одном была установлена излучающая антенна, с другого судна обеспечивалась работа приемной антенны. Излучающая антенна крепилась на поворотном устройстве к борту судна и могла обеспечивать сканирование акватории узким лучом параметрического излучения в диапазоне углов $-90^\circ - +90^\circ$ в горизонтальной плоскости. Во время излучения сигналов судно стояло на якоре. Антенна располагалась на глубине 1.5–1.7 м и ось излучения была ориентирована горизонтально. Глубина места в районе экспериментов была 2.5–3 м. Параметрическая антенна была выполнена в виде мозаики излучающих элементов, половина которых излучала высокочастотный сигнал накачки на одной частоте, а другая половина на другой, мало отличающейся по величине. Средняя частота излучения (частота накачки) была 150 кГц. Разностная частота или частота излучения сигнала лежала в диапазоне 5 кГц – 20 кГц. На антенну подавалась электрическая мощность 1 кВт для каждой из частот накачки. Приемная антенна была выполнена в виде вертикальной цепочки восьми гидрофонов, которые располагались с шагом 0.25 м на металлической штанге. Эта штанга в составе жесткой конструкции устанавливалась на дне таким образом, что вертикальная цепочка гидрофонов перекрывала весь волновод. Сигнал от приемных элементов антенны по кабелю передавался на борт приемного судна, где он оцифровывался и регистрировался для последующей обработки. Вертикальное распределение скорости распространения звука в волноводе определялось солнечным прогревом его верхней части в дневное время суток (рис. 1). Учитывая высокую направленность, излучение параметрической антенны осуществлялось в режиме снятия диаграммы направленности, когда излучающая антенна медленно поворачивалась в горизонтальной плоскости. Излучалась последовательность импульсов. Длительность импульса 2 мс, интервал между импульсами около 300 мс. Регистрировались сигналы параллельно с каждого приемника вертикальной антенны. Измерения были выпол-

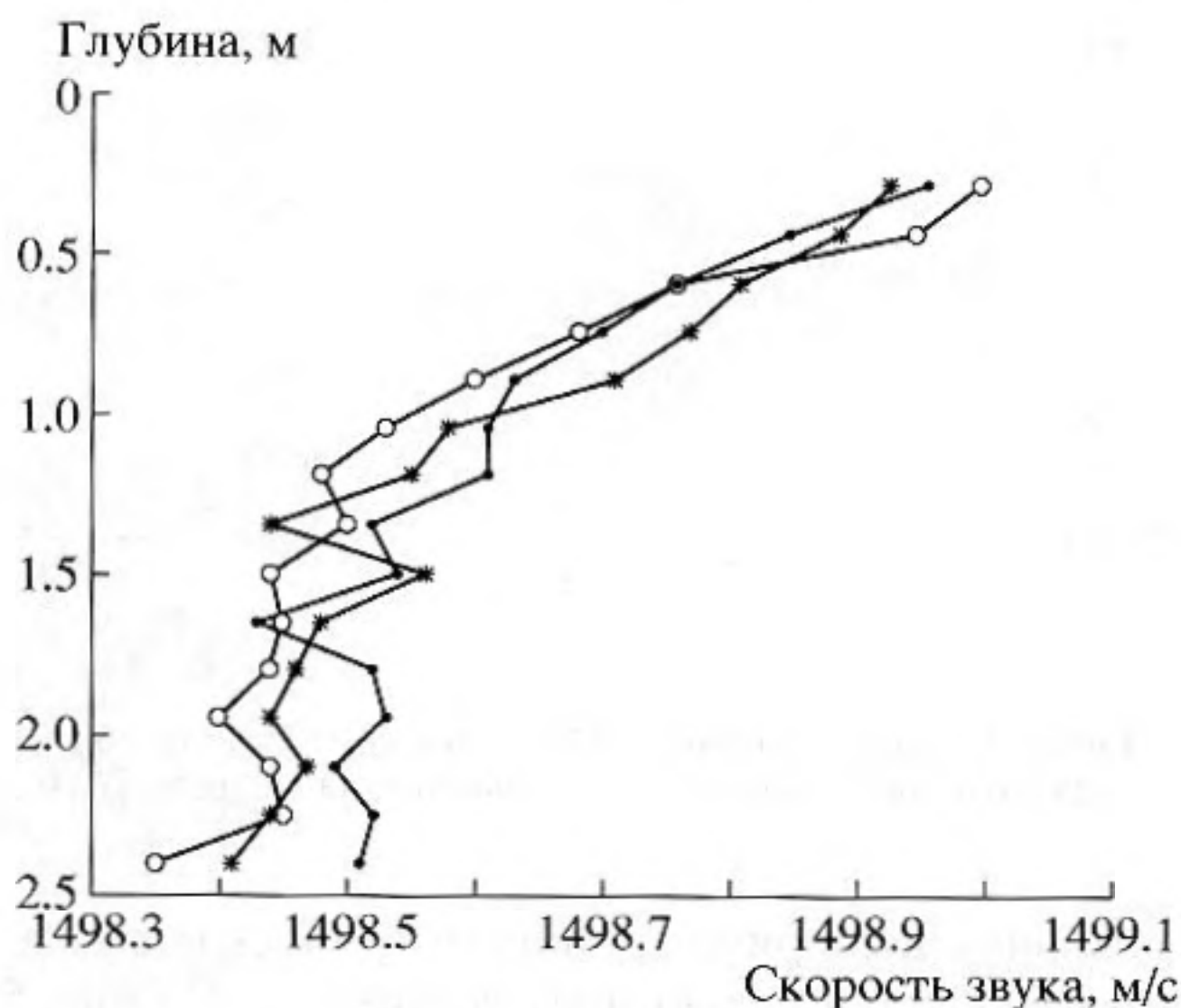


Рис. 1. Профиль скорости звука в волноводе. Разные значки соответствуют измерениям, сделанным с интервалом 1 час.

нены при расстояниях между излучателем и приемной антенной от 1 км до 5.60 км.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовались частотно-временные характеристики распространения импульсов длительностью 2 мс с заполнением, частота которого имела линейную модуляцию в полосе 7 кГц – 15 кГц. При этом развертка по частоте сигнала осуществлялась с нижних частот к верхним, что соответствовало нормальной волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала увеличивается с частотой. На рис. 2 показаны осциллограммы акустических импульсов, зарегистрированных на различных дистанциях. Этот результат показывает изменение формы импульса по мере его распространения в волноводе. В форме сигнала можно выделить предвестник постоянной амплитуды и собственно сам ЛЧМ сигнал. Дополнительный частотно-временной анализ показал, что спектр предвестника лежит в диапазоне 14–16 кГц, что соответствует второй гармонике излучаемого сигнала (рис. 3).

На рис. 4 приведен пример записи сигналов, зарегистрированных на вертикальной цепочке гидрофонов на расстоянии 1000 м от излучателя. Видно, что основная энергия излучения концентрируется в средней части волновода. Детальный анализ показал, что сигналы, зарегистрированные разными гидрофонами приемной антенны, оказываются в фазе по всей глубине волновода, что свидетельствует о преимущественно одномодовом режиме распространения сигнала. То есть

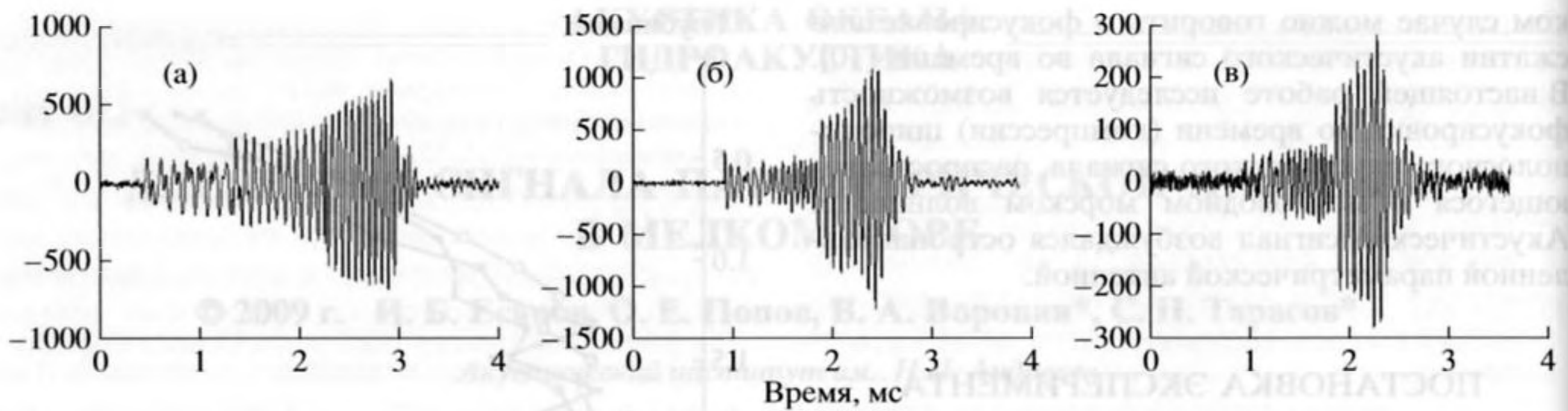


Рис. 2. Осциллограммы ЛЧМ сигнала, распространяющегося в мелководном волноводе. а – расстояние 1 км, амплитуда сигнала 51 Па, б – 2.5 км, амплитуда сигнала 87 Па, в – 3.8 км, амплитуда сигнала 22 Па.

в условиях эксперимента параметрическая антенна возбуждала первую моду волновода. На рис. 5 сравниваются экспериментальные и расчетные данные для нормированного вертикального распределения акустического поля в волноводе. Экспериментальные данные соответствуют амплитуде импульсов на вертикальной цепочке гидрофонов на частоте 15 кГц (полоса 500 Гц). Собственная функция первой моды рассчитана для измеренного профиля скорости звука и дна в виде жидкого полупространства со следующими параметрами: плотность грунта на дне 1800 кг/м^3 , а скорость распространения звука в грунте считалась равной 1520 м/с . Скорость звука в воде принималась равной 1499 м/с . Расчет частотной зависимости скорости распространения сигнала в однородном мелководном волноводе выполнялся с учетом условий на границах волновода. Верхняя граница волновода свободная, поэтому звуковое давление на ней обращается в нуль. Характер распределения и то, что оно практически не зависит от дистанции, также указывает на то, что распро-

странение сигнала можно характеризовать как одномодовое.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Условия распространения в мелководном волноводе в нашем случае соответствовали нормальной волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала увеличивается с частотой. Следовательно, для достижения эффекта сжатия широкополосного сигнала при его распространении в волноводе нужно обеспечивать возрастание частоты за время излучения сигнала. Такой режим модуляции и был использован в наших экспериментах.

Сделанный расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в волноводе. На рис. 6 показана зависимость такой задержки для различных дистанций, пройденных сигналом. Как видно, наклон дисперсионной кривой для ЛЧМ сигнала хорошо соответствует частотно-временной обработке сигнала, измеренного на дистанции 466 м. С увеличением дистанции меняются частотно-временные соотношения в сигнале. Растет задержка низкочастотных составляющих сигнала, в результате чего сокращается разница во времени прихода начала и конца параметрического сигнала, что соответствует сокращению его длительности. Анализ показывает, что дальнейшая трансформация задержки приходов различных частотных составляющих происходит таким образом, что время прихода низкочастотных и высокочастотных составляющих может совпасть на дистанции приблизительно в 6 км для условий настоящего эксперимента. Опыт показывает, что для достижения полного синхронизма времени прихода всех частотных составляющих сигнала необходима специальная частотная модуляция, соответствующая особенностям дисперсии в волноводе. Поскольку дисперсия скорости распро-

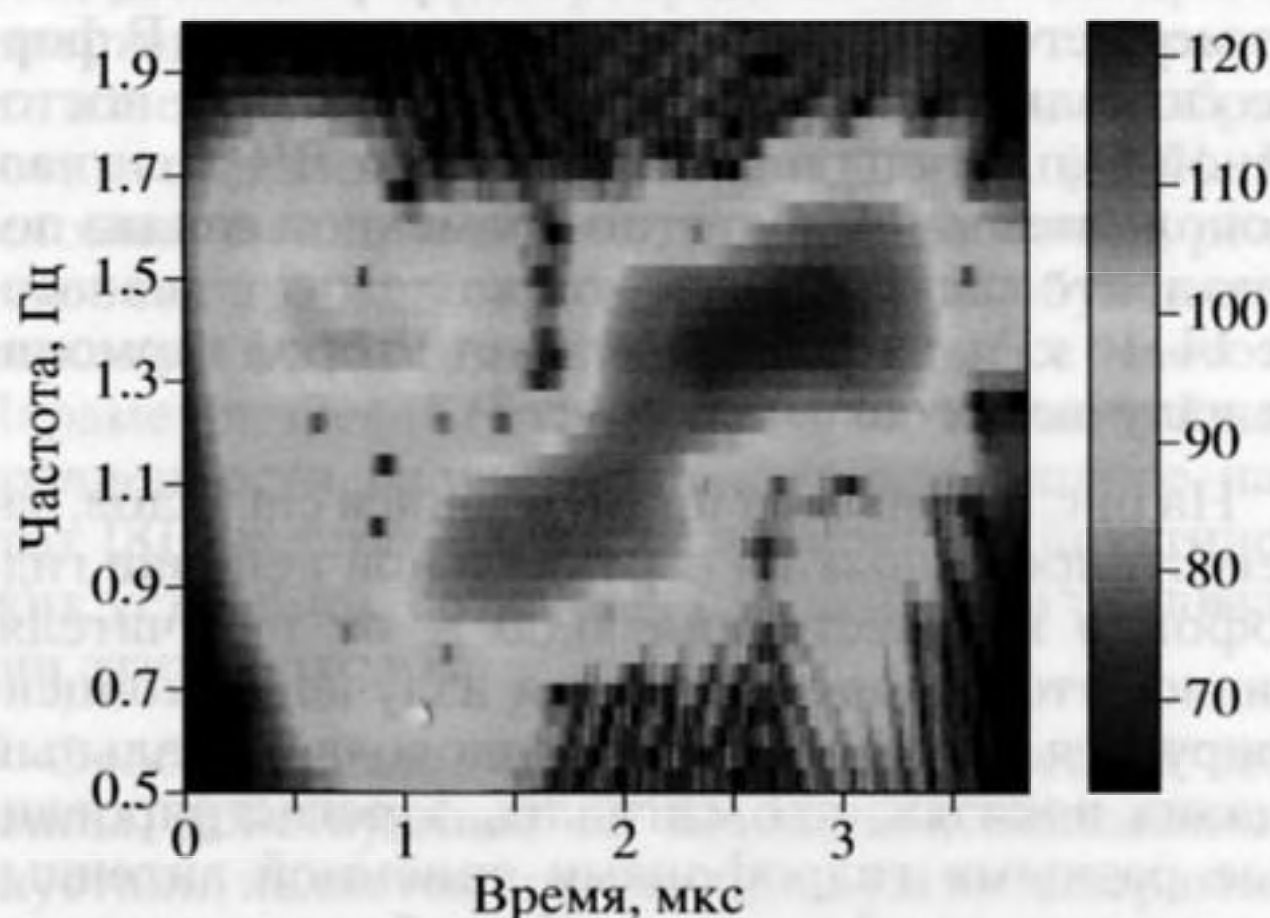


Рис. 3. Частотно-временной спектр параметрического сигнала. Дистанция 466 м.

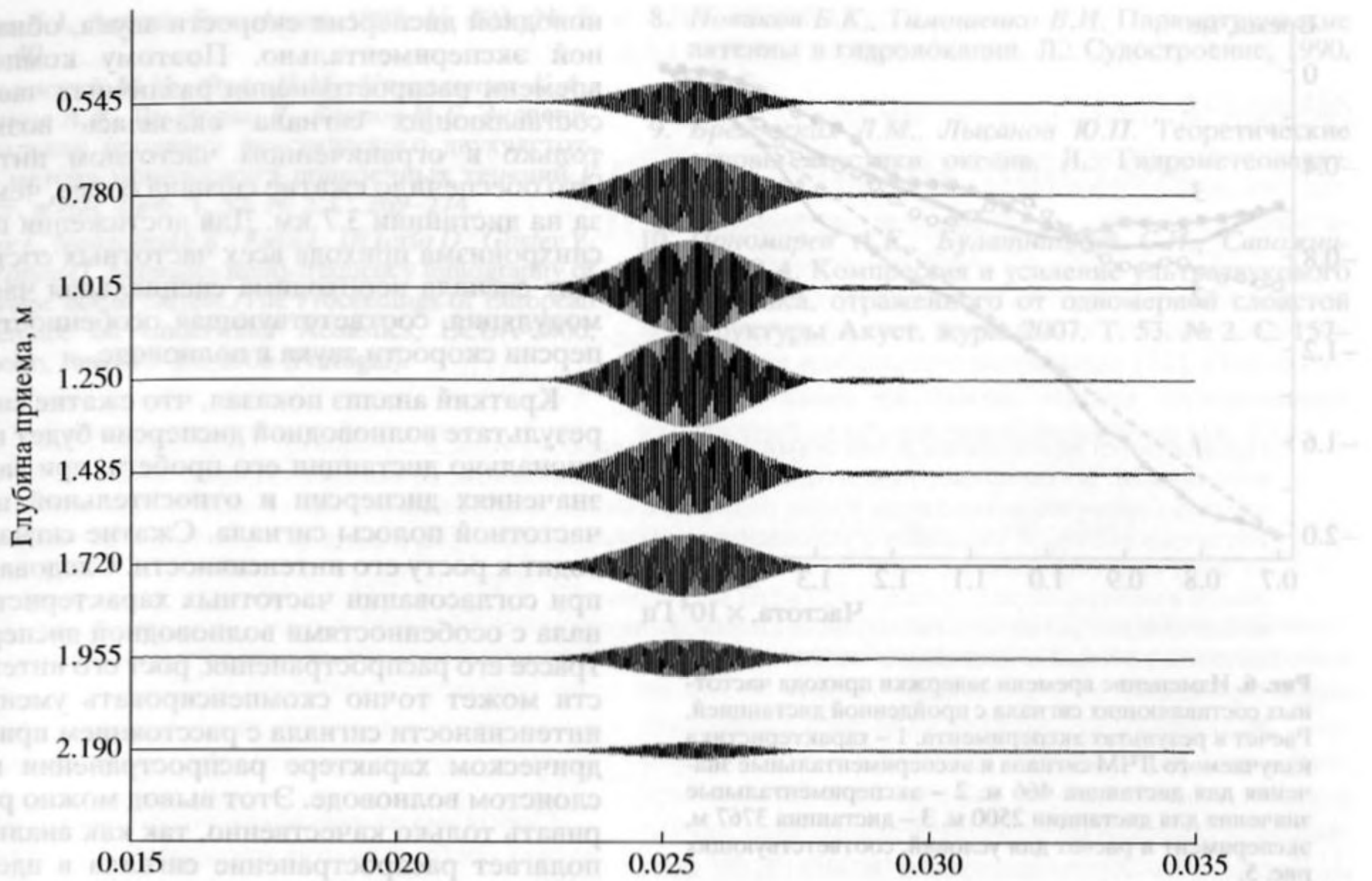


Рис. 4. Сигналы на вертикальной цепочке гидрофонов, расстояние 1000 м. Частота 15кГц, длина импульса 2 мс.

странения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

Предельное сжатие сигнала τ определяется эффективной частотной полосой его спектра Δf , $\tau = (\Delta f)^{-1}$. С другой стороны, длительность изучаемого импульса T при условии его полного сжатия на дистанции L будет определяться частотной дисперсией dc/df скорости распространения c ; $T = L \frac{dc/df}{c^2} \Delta f$.

Таким образом, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в отношении T/τ раз $T/\tau = L \frac{dc/df}{c^2} \Delta f^2$. То есть эффект увеличения интен-

сивности пропорционален дистанции, на которую распространяется сигнал, величине волноводной дисперсии и квадрату частотной полосы сигнала. При этом увеличивается соотношение между сигналом и шумом, который накапливается в регистрирующей аппаратуре за время приема сигнала τ .

Заметим, что групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется парамет-

рами волновода. В частности, для волновода Пеккериса с постоянной, не зависящей от глубины скоростью распространения звука c_0 , частотная зависимость скорости распространения сигнала

определяется соотношением $c = c_0 \left[1 - \frac{c_0^2 l^2}{(2fH)^2} \right]^{1/2}$,

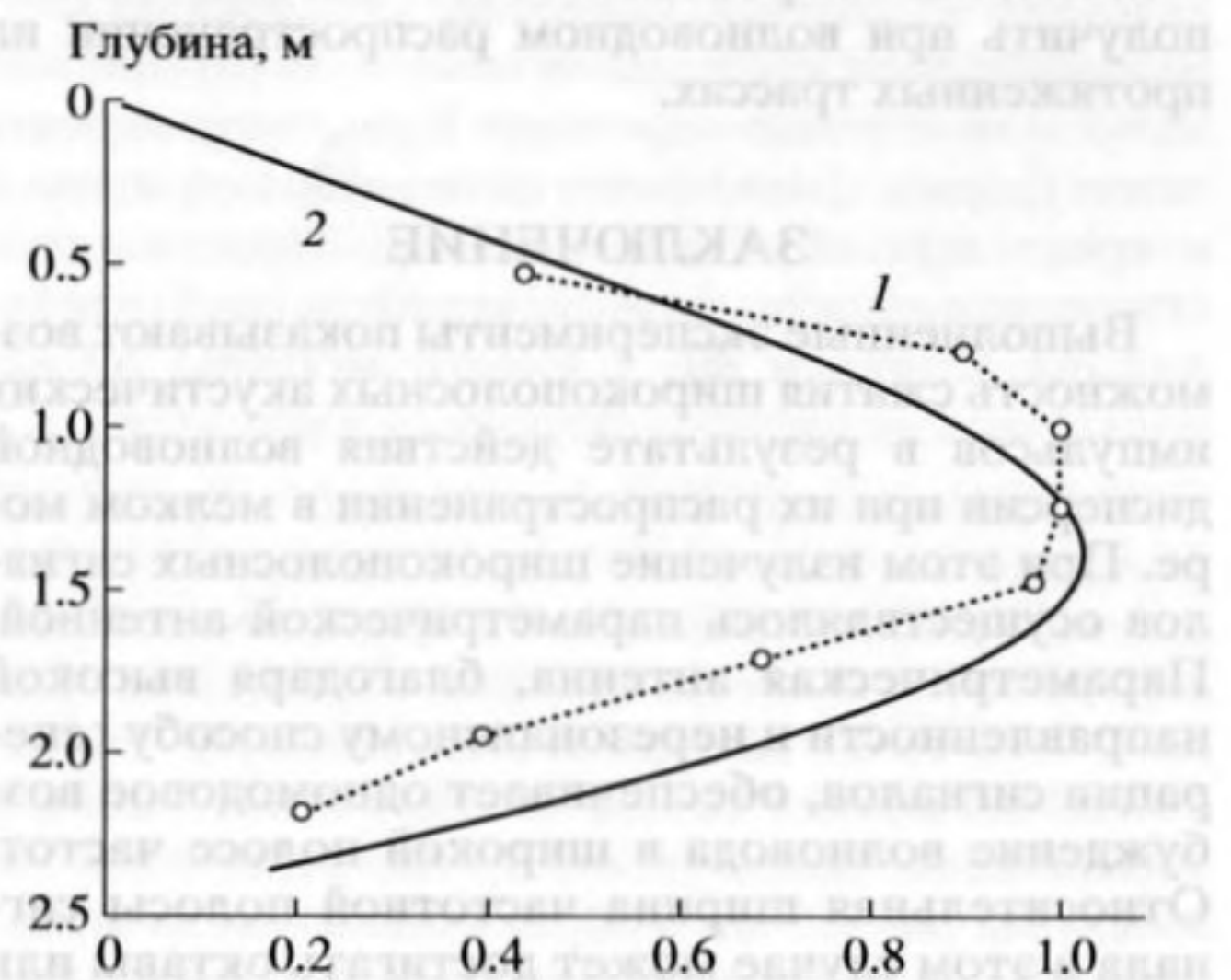


Рис. 5. Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода – 1 и расчет собственной функции первой моды – 2.

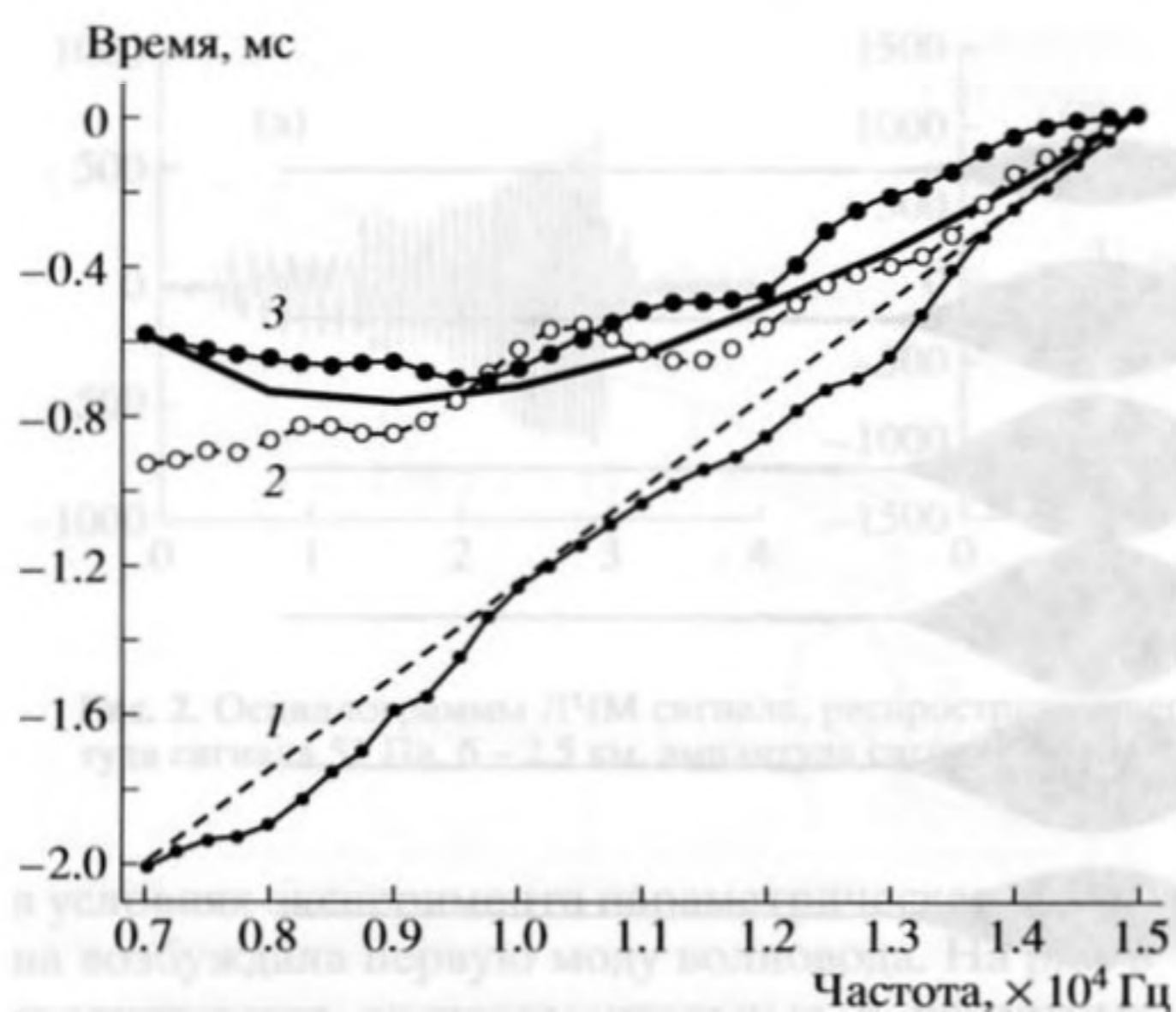


Рис. 6. Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала с пройденной дистанцией. Расчет и результат эксперимента. 1 — характеристика излучаемого ЛЧМ сигнала и экспериментальные значения для дистанции 466 м. 2 — экспериментальные значения для дистанции 2500 м. 3 — дистанция 3767 м, эксперимент и расчет для условий, соответствующих рис. 5.

где H — вертикальный масштаб волновода, l — номер моды. Откуда получаем предельную оценку частотной дисперсии скорости звука в волноводе $dc/df \approx f^{-2}$. При излучении сигнала с постоянной относительной частотной полосой $\Delta f/f = \text{const}$ оказывается, что относительное сжатие сигнала T/τ увеличивается с увеличением дистанции распространения сигнала L . Поэтому наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала можно получить при волноводном распространении на протяженных трассах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты показывают возможность сжатия широкополосных акустических импульсов в результате действия волноводной дисперсии при их распространении в мелком море. При этом излучение широкополосных сигналов осуществлялось параметрической антенной. Параметрическая антенна, благодаря высокой направленности и нерезонансному способу генерации сигналов, обеспечивает одномодовое возбуждение волновода в широкой полосе частот. Относительная ширина частотной полосы сигнала в этом случае может достигать октавы или более.

Использованный в наших опытах ЛЧМ сигнал не соответствовал в полной мере характеру вол-

новодной дисперсии скорости звука, обнаруженной экспериментально. Поэтому компенсация времени распространения различных частотных составляющих сигнала оказалась возможной только в ограниченном частотном интервале. Это обеспечило сжатие сигнала более, чем в 4 раза на дистанции 3.7 км. Для достижения полного синхронизма прихода всех частотных составляющих сигнала необходима специальная частотная модуляция, соответствующая особенностям дисперсии скорости звука в волноводе.

Краткий анализ показал, что сжатие сигнала в результате волноводной дисперсии будет пропорционально дистанции его пробега, при заданных значениях дисперсии и относительной ширины частотной полосы сигнала. Сжатие сигнала приводит к росту его интенсивности. Следовательно, при согласовании частотных характеристик сигнала с особенностями волноводной дисперсии по трассе его распространения, рост его интенсивности может точно скомпенсировать уменьшение интенсивности сигнала с расстоянием при цилиндрическом характере распространения моды в слоистом волноводе. Этот вывод можно рассматривать только качественно, так как анализ предполагает распространение сигнала в идеальном однородном волноводе без потерь.

Наиболее эффективно сжатие сигналов, имеющих широкую частотную полосу, что, соответственно, возможно осуществить на достаточно протяженных трассах. Поэтому параметрическая антенна, в силу своих особенностей к селективному возбуждению мод в волноводе в широкой полосе частот, представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в морских волноводах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и гранта МНТЦ (проект 3770).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Об эффективности фокусировки звукового поля в океаническом волноводе в присутствии фоновых внутренних волн // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 693–701.
2. Григорьев В.А., Кузькин В.М. Управление фокусировкой поля в многомодовых плоскостойких волноводах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 352–359.
3. Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Edelmann G., Akai T. Echo-to-reverberation enhancement using a time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 115. № 4. P. 1525–1531.
4. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография. Акуст. журн 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
5. Kuperman W.A. et al. Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal

- mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 1. P. 25–40.
6. Чарнотский М.И., Фукс И.М., Наугольных К.А., Смирнов А.В., Ди Иорио Д., Есипов И.Б. Экспериментальная проверка акустического двухчастотного метода мониторинга поперечных течений // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 2. С. 269–274.
7. Esipov I., Naugolnykh K., Fuks I., Di Iorio D., Gostev V. and Popov O. Acoustics multi-frequency tomography of transverse ocean current./The Proceedings of European Conference on Underwater Acoustics, ECUA-2006, Cavoeiro, June, 12–15. 2006 (Portugal).
8. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1990, 256 с.
9. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 264 с.
10. Пономарев А.Е., Булатницкий С.И., Сапожников О.А. Компрессия и усиление ультразвукового импульса, отраженного от одномерной слоистой структуры Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 2. С. 157–167.