

КОМПРЕССИЯ СИГНАЛА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ

© 2019 г. И. Б. Есипов^{a, *}, О. Е. Попов^b, Г. В. Солдатов^c

^aРоссийский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

^bИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^cТаганрогский технологический институт Южного федерального университета, Таганрог, Россия

*e-mail: igor.esipov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2019 г.

После доработки 11.03.2019 г.

Принята к публикации 20.03.2019 г.

Частотная дисперсия скорости распространения звука в морском волноводе приводит к возможности компрессии акустического сигнала с ростом его интенсивности. Приводятся результаты экспериментального исследования этого эффекта при распространении широкополосного акустического сигнала параметрической антенны в мелком море. Параметрическая антенна 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.

Ключевые слова: параметрическая антенна, волноводное распространение, волноводная дисперсия сигнала, одномодовый сигнал

DOI: 10.1134/S0320791919040051

ВВЕДЕНИЕ

Параметрическая антенна (ПА) формируется в среде при коллинеарном взаимодействии интенсивных звуковых волн, так называемой, накачки. Такая антенна достаточно известна как инструмент для профилирования донных структур. Особенностью параметрической антенны является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (обычно несколько градусов углового разрешения) для низкочастотных сигналов [1]. Эффективная ширина диаграммы остается постоянной в широком диапазоне частот. Параметрическая антенна отличается от обычных антенн с сопоставимыми характеристиками направленности относительно небольшими размерами, широкой частотной полосой излучаемого сигнала (2 октавы и более) и острой характеристикой направленности во всем частотном диапазоне. Практика применения ПА показывает, что они обеспечивают одномодовое возбуждение подводного звукового канала [2]. Расширение полосы акустических сигналов приводит к повышению пространственного разрешения исследований, улучшению качества передачи информации и подводной связи, открывает возможность применения новых подходов в гидрофизических исследованиях, в частности акустической томографии морских аквато-

рий с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [3, 4]. Л.М. Бреховских отмечал, что акустические характеристики ПА делают ее “идеальным инструментом для акустики океана” [5]. Дело в том, что с появлением параметрических антенн возникла дискуссия о возможности их конкуренции с традиционными гидроакустическими инструментами. Характер такой дискуссии частично отражен в [6]. В частности, там отмечается, что в ситуациях с существенной реверберацией акустического сигнала узкий луч и отсутствие боковых лепестков могут более чем возмещать низкие уровни параметрического источника. И там же указывается, что можно использовать более широкую полосу для улучшения соотношения сигнал/шум с помощью широкополосной обработки сигнала. Кроме того, заметим, что эффективность излучения параметрической антенны возрастает с увеличением ее мощности при зондировании океана на протяженных трассах [7]. В настоящей работе развивается идея повышения соотношения сигнал/шум с помощью параметрической антенны при использовании дисперсионных свойств подводного вол-

новода для концентрации энергии широкополосных акустических сигналов.

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 [8, 9]. Причем эту проблему предпочитают решать методом обращения волнового фронта [10–12]. 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. Параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот [13] является одним из возможных акустических устройств, создающих условия для реализации этих подходов.

Цель этой работы — обсудить возможности гидроакустической антенны, действующей на принципах нелинейной акустики, концентрировать энергию излучаемого акустического сигнала в заданной области пространства волновода при компрессии широкополосного сигнала за счет волноводной дисперсии. Приводятся результаты экспериментального и численного исследования особенностей распространения широкополосного параметрического излучения в подводном звуковом канале.

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Обычно подводный волновод формируется верхним теплым слоем воды и холодным промежуточным. Поэтому мониторинг толщины волновода может дать весьма ценную информацию о морском волноводе и изменениях его параметров. Прямые измерения вертикального распределения температуры и солености и других параметров холодного промежуточного слоя на трассе протяженностью в сотни километров являются трудными и дорогостоящими. Постоянный мониторинг его динамики на протяженной трассе может быть осуществлен акустическими методами. Проблема определения параметров слоя может быть решена с помощью одномодового возбуждения акустических сигналов в широкой полосе частот. Измерение скорости распространения звука вдоль протяженной трассы позволит изучить один из типично акустических эффектов подводного волновода — модовую дисперсию. Модовая дисперсия в подводном волновом канале означает, что моды одного и того же номера имеют различную групповую скорость распространения на различных частотах [14]. Поэтому широкополосные сигналы меняют свою форму в процессе рас-

пространения и это изменение может быть экспериментально зафиксировано. Измерение групповой скорости позволит определить средний профиль скорости звука в подводном волноводе.

Наиболее информативной для определения профиля скорости звука в подводном звуковом канале является дисперсия мод нижних номеров с первой по третью. Это связано с тем фактом, что собственные функции этих мод концентрируются в подводном волноводе и их групповая скорость наиболее чувствительна к вертикальному профилю волновода. На рис. 1 показаны профили скорости звука в черноморском волноводе для различных месяцев. Видно, что скорость звука в Черном море достигает минимума на глубине 40–60 м. Таким образом, на этой глубине расположена ось звукового канала. При этом собственные функции первой моды, соответствующие сигналам разных частот, как показано на рис. 2, по-разному заполняют волновод. Если первая мода высокочастотного сигнала в основном концентрируется около оси подводного звукового канала, то низкочастотные сигналы занимают область канала с более высокими скоростями распространения, что приводит к частотной дисперсии скорости распространения сигнала. На рис. 3 показана спектрограмма, характеризующая дисперсию групповой скорости для первой моды сигнала в диапазоне частот 200–1200 Гц для сентябрьского профиля скорости распространения звука в Черном море. Видно, что это типичная дисперсия для подводного волновода, когда групповая скорость первой моды уменьшается с частотой, а задержка с приходом сигнала во времени увеличивается с частотой.

Результаты расчета по программе К.В. Авилова искажения формы сигнала при его распространении по трассе длиной до 500 км в условиях черноморского волновода показаны на рис. 4. Короткий акустический импульс возбуждался на первой моде волновода в частотной полосе 200–1200 Гц для сентябрьского профиля скорости звука (рис. 1). Как видно на рис. 4, сигнал остается еще коротким на дистанции 1 км (длительность импульса менее 5 мс), но на дистанции 500 км длительность импульса становится уже около 80 мс с выраженной частотной модуляцией, т.е. длительность акустического импульса изменилась в 16 раз. Таким образом, частотно модулированный сигнал длительностью 80 мс при распространении в Черном море по трассе длиной 500 км (расстояние от Кацивели (Крым) до Сухума) может сжаться в импульс длительностью 5 мс, увеличивая при этом свою интенсивность.

Предельное сжатие сигнала τ определяется эффективной частотной полосой его спектра Δf , $\tau = (\Delta f)^{-1}$. С другой стороны, длительность излучаемого импульса T при условии его полного сжа-

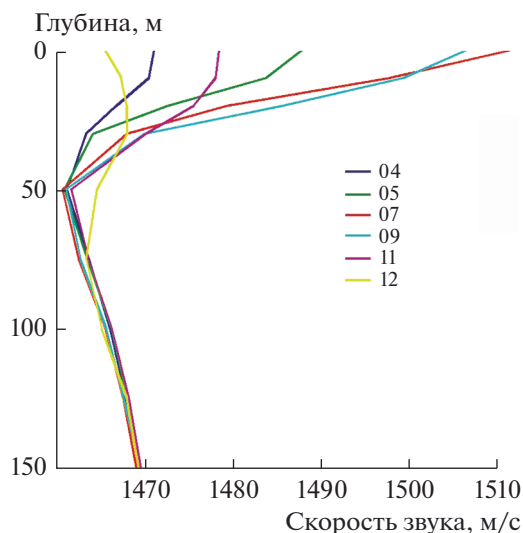


Рис. 1. Сезонное изменение профиля скорости звука в Черном море. Номера кривых соответствуют месяцам года.

тия на дистанции L будет определяться частотной дисперсией $\partial c/\partial f$ скорости распространения звуковой волны c :

$$T = L \frac{\partial c/\partial f}{c^2} \Delta f. \quad (1)$$

Следовательно, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в отношении T/τ раз:

$$T/\tau = L \frac{\partial c/\partial f}{c^2} \Delta f^2. \quad (2)$$

Таким образом, эффект увеличения интенсивности 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 параметрами волновода. В частности, для волновода Пекериса с постоянной, независимой от глубины скоростью распространения звука c_0 , частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением:

$$c = c_0 \left[1 - \frac{c_0^2 l^2}{(2fH)^2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где H – вертикальный масштаб волновода, l – номер моды. Отсюда получаем предельную оценку частотной дисперсии скорости звука в волноводе $\partial c/\partial f \approx f^{-2}$. При излучении сигнала с постоянной

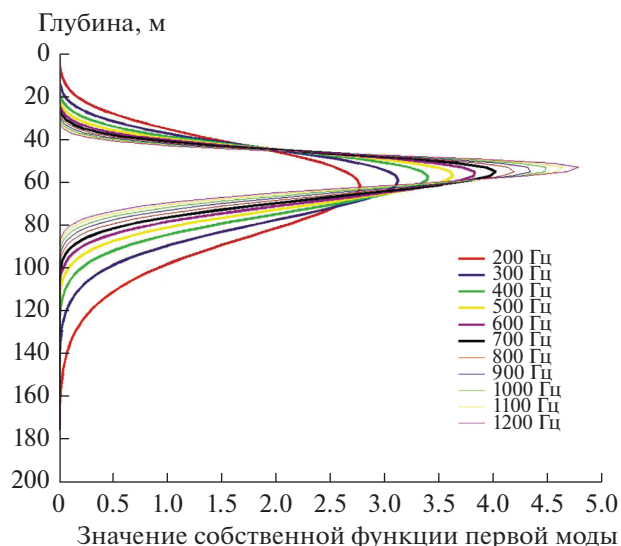


Рис. 2. Собственные функции первой моды для частот от 200 до 1200 Гц для сентябрьского профиля скорости звука на рис. 1.

относительной частотной полосой $\Delta f/f = \text{const}$ оказывается, что относительное сжатие сигнала T/τ увеличивается с увеличением дистанции распространения сигнала L и уменьшением толщины волновода. Поэтому наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала можно получить при волноводном распространении в мелком море на протяженных трассах.

Таким образом, длительность частотно модулированного сигнала в процессе его распространения в волноводе уменьшается с расстоянием

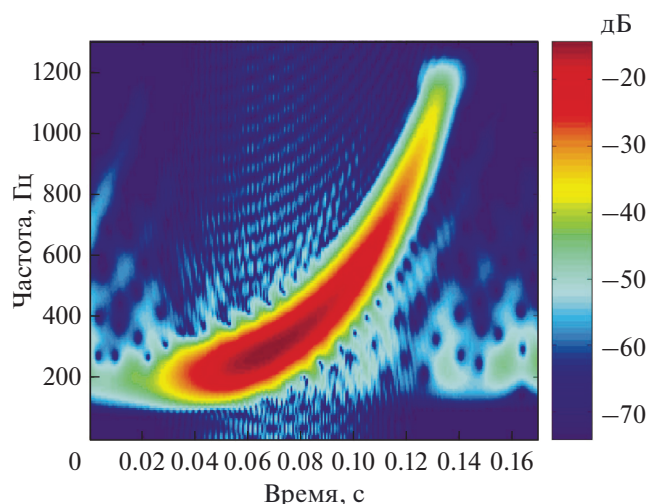


Рис. 3. Спектрограмма сигнала на расстоянии 500 км от источника при возбуждении первой моды волновода в полосе частот 200–1200 Гц.

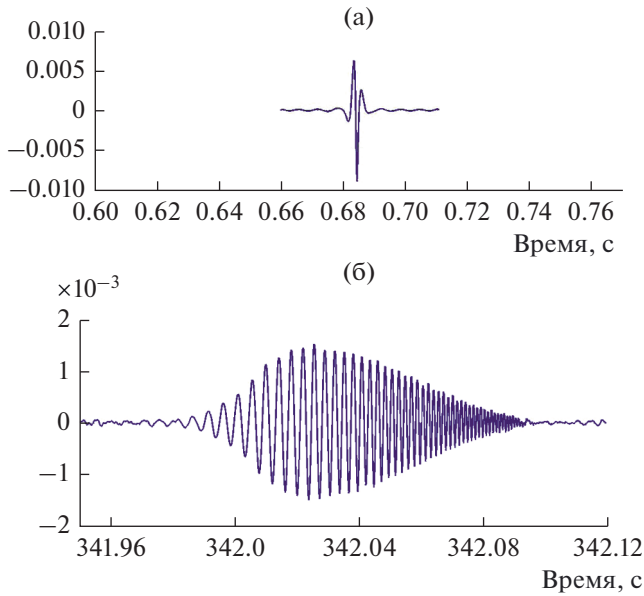


Рис. 4. (а) Сигнал на расстоянии 1 км от источника при возбуждении первой моды в полосе частот 200–1200 Гц, (б) сигнал на расстоянии 500 км. По оси абсцисс абсолютное время распространения сигнала, по оси ординат уровень сигнала в относительных единицах.

$T(r) = T_0 - \Delta T$, где T_0 – начальная длительность сигнала. Изменение длительности связано согласно выражению (1) с величиной частотной дисперсии в волноводе $\partial c/\partial f$ и дистанцией L , на которой достигается максимальная компрессия сигнала

$$\Delta T = rc^{-2} \frac{\partial c}{\partial f} \Delta f, \quad (4)$$

где r – пройденная сигналом дистанция. Далее, используя закон сохранения энергии, можно получить выражение для интенсивности сигнала при его распространении в волноводе. Имея в виду, что точность определения длительности сигнала $\tau = \Delta f^{-1}$ связана с его частотной полосой Δf , получим:

$$I(r) = I_0 \frac{R}{r} \left(\frac{T_0}{T + \tau} \right) = I_0 \frac{R}{Lr} \frac{L}{1 - r/L + \tau/T_0}, \quad (5)$$

здесь R – пространственный масштаб, характерный для волноводного распространения, L – дистанция максимального сжатия сигнала, I_0 – начальная интенсивность сигнала при входе в волновод.

Для широкополосного сигнала $\tau/T_0 \ll 1$ и относительная интенсивность $I(r)/I_0$ достигает максимума при $r = L$ (рис. 5). Максимум отношения $I(r)/I_0$ зависит от дисперсионных свойств волновода и квадрата частотной полосы сигнала.

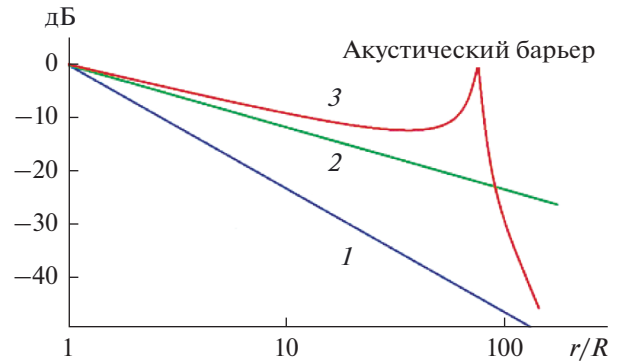


Рис. 5. Зависимость интенсивности акустического сигнала от пройденной дистанции r/R . 1 – однородная среда $(I/I_0)(R/r)^2$, 2 – идеальный волновод $(I/I_0)(R/r)$, 3 – частотно модулированный сигнал в волноводе (выражение (5)), R – пространственный масштаб акустического поля.

Это отношение, согласно выражениям (1)–(3), можно определить как

$$\frac{I_{\max}}{I_0} \Big|_{r=L} = rc^{-2} \frac{\partial c}{\partial f} \Delta f^2. \quad (6)$$

Отношение I_{\max}/I_0 быстро возрастает с увеличением частотной полосы сигнала и может достигать 1 или даже более того при октавной полосе сигнала.

На рис. 5 показано относительное изменение интенсивности частотно модулированного сигнала в сравнении с типичными примерами сферического распространения сигнала в однородной среде или цилиндрического распространения в идеальном волноводе. Видно, что интенсивность частотно модулированного сигнала достигает максимума, образуя своеобразный акустический барьер. За этим барьером происходит быстрый спад интенсивности сигнала, поскольку его длительность начинает быстро увеличиваться в результате частотной дисперсии.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Особенностью параметрической антенны является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (6° – характерная ширина диаграммы в вертикальной плоскости в наших исследованиях) 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 ампли-

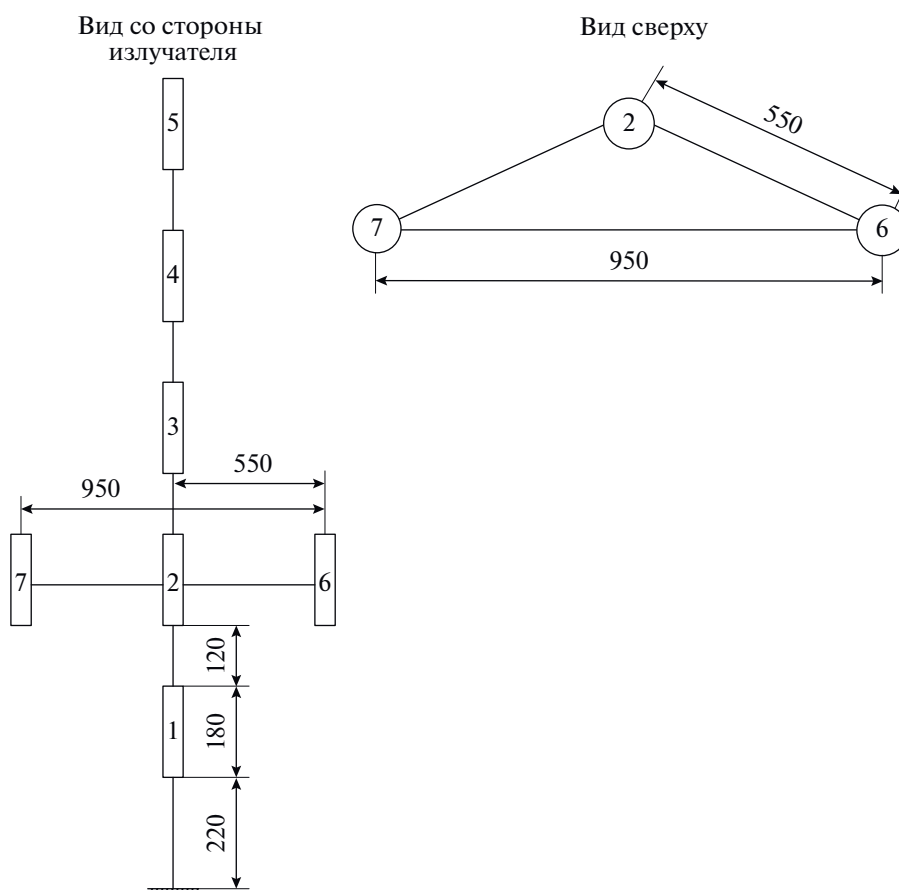


Рис. 6. Схема расположения гидрофонов в приемной антенне. Числа показывают соответствующие расстояния в мм.

туде. 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.

Экспериментальные исследования выполнялись в августе 2018 г. в Таганрогском заливе Азовского моря. Излучающая антенна устанавливалась на дне и с помощью поворотного устройства могла обеспечивать сканирование акватории узким лучом параметрического излучения в горизонтальной плоскости, ось излучения была ориентирована горизонтально.

Параметрическая антенна имела излучающую поверхность размером 30×20 см и 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 5–20 кГц. Электрическая мощность усилителя антенны была 1 кВт для каждой из частот накачки. Приемная антенна была выполнена в виде вертикальной цепочки из пяти гидрофонов, которые располагались с шагом 0,3 м на металлической штанге. Эта штанга в составе жесткой конструкции устанавливалась на дне таким образом, что вертикальная цепочка гидрофонов перекрывала практически весь волновод. Еще два гидрофона крепились по бокам вертикальной цепочки на уровне 2-го гидрофона, как это показано на рис. 6, для обеспечения пеленгации принимаемого сигнала. Глубина места в районе экспериментов мало менялась и была около 2 м. 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 оказалось довольно изменчивым, оно заметно менялось со временем и с местом измерения (рис. 7). Такое распределение можно характеризовать как изо-

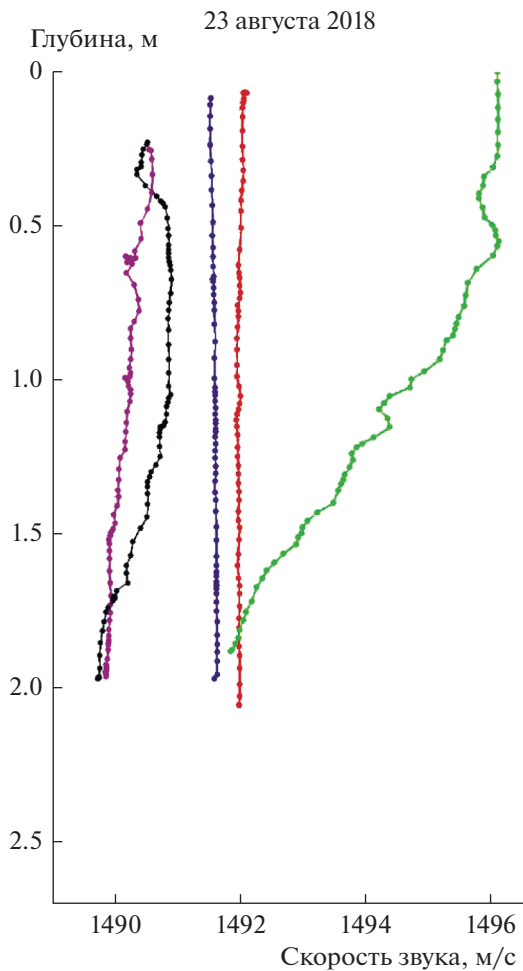


Рис. 7. Профили скорости распространения звука на акватории в день эксперимента. Различные кривые соответствуют разному времени от 08 до 15 ч и расстояниям от 0 до 3 км.

тропное, либо обеспечивающее придонное распространение звука.

На рис. 8 показана диаграмма направленности, измеренная на дистанции 1000 м от излучателя в широком диапазоне частот излучения. Видно, что в диапазоне частот от 5 до 15 кГц направленность параметрического излучения практически не меняется и составляет 10° по уровню половинной мощности излучения. В вертикальной плоскости эта направленность еще выше из-за особенностей конструкции излучателя. Учитывая высокую направленность излучения параметрической антенны, методика измерений осуществлялась в режиме снятия диаграммы направленности, когда излучающая антенна медленно поворачивалась в горизонтальной плоскости. Определялся максимум интенсивности принятых сигналов на стационарно стоящей на дне вертикальной цепочке приемников. После этого излучались импульсы частотно модулированных сигналов. Длитель-

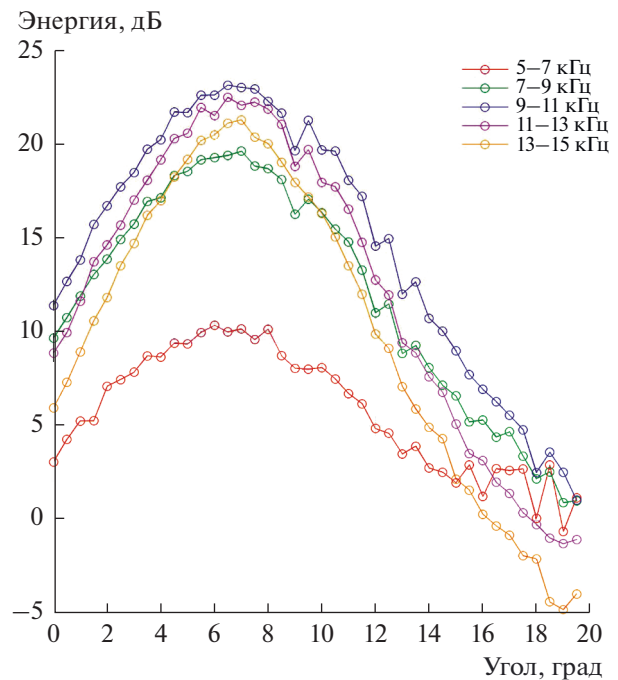


Рис. 8. Направленность параметрического излучения, измеренная на дистанции 1000 м в мелководном волноводе.

ность импульса излучения менялась от 0.7 до 3 мс, интервал между импульсами около 300 мс. Регистрировались сигналы параллельно с каждого приемника вертикальной антенны. Измерения были выполнены при расстояниях между излучателем и приемной антенной от 0.5 до 1.5 км. На больших расстояниях сигнал быстро затухал в результате придонного распространения звука.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовались частотно-временные характеристики распространения импульсов, частота заполнения которых менялась в полосе 7–15 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. Как показал анализ полученных результатов, выбор такого диапазона частот был оптимальным для данного опыта. Несмотря на то, что волноводная дисперсия возрастает с понижением частоты, при этом падает и эффективность излучения параметрической антенны. С ростом частоты растет эффективность параметрического излучения, но быстро падает дисперсия. В выбранном нами частотном диапазоне была достаточной волноводная дисперсия, и интенсивность параметрического сигнала на дистанциях 1000 и 1500 м мало менялась во всем частотном диапазоне. На рис. 9 показаны осцилло-

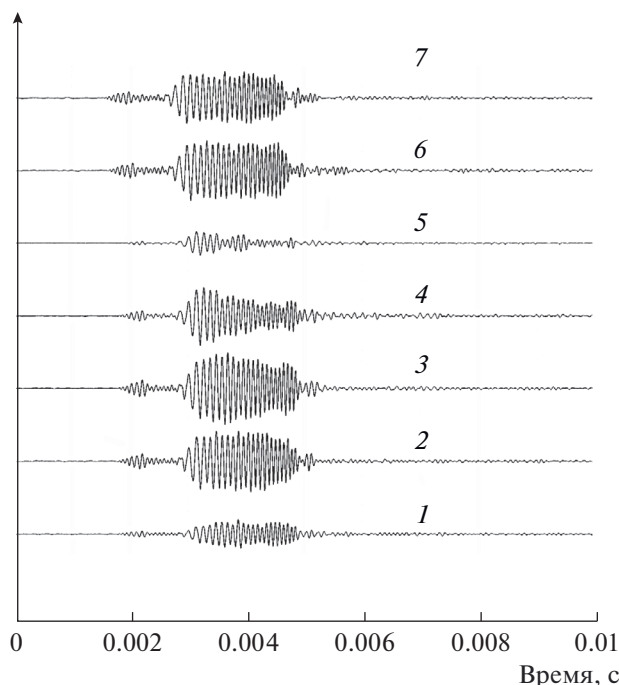


Рис. 9. Осциллограммы сигналов, зарегистрированные гидрофонами приемной антенны. Номера соответствуют номерам гидрофонов на рис. 6. Максимальный уровень сигнала регистрируется гидрофонами 2 и 3, что соответствует придонному распространению.

граммы акустических ЛЧМ импульсов длительностью 3 мс, зарегистрированных гидрофонами приемной антенны на дистанции 1000 м. Видно, что поле параметрического излучения сконцентрировано, в основном, в средней части волновода, а сигналы, зарегистрированные разными гидрофонами приемной антенны, оказываются в фазе по всей глубине волновода, что соответствует первой моде возбуждения волновода.

Осциллограммы показывают типичные особенности, связанные с распространением импульса параметрического излучения в волноводе. В форме сигнала можно выделить предвестник, связанный с возбуждением второй гармоники основного сигнала и собственно сам ЛЧМ сигнал (рис. 10). При этом, длительность ЛЧМ сигнала при регистрации оказалась 2 мс, в то время как длительность излучаемого импульса была 3 мс. Длительность широкополосного сигнала сократилась на 1 мс при распространении в волноводе на дистанцию 1000 м. Эти особенности отмечались и ранее при исследовании волноводного распространения сигнала параметрической антенны [2].

В результате анализа характера частотной дисперсии скорости волноводного распространения звука в данных условиях можно было ожидать полной компрессии параметрического сигнала в выбранной частотной полосе при длительности

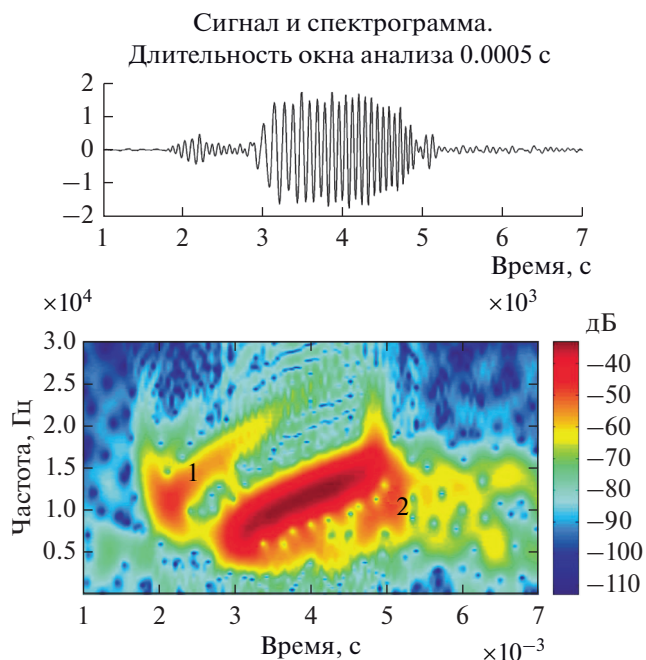


Рис. 10. Спектрограмма ЛЧМ сигнала длительностью 3 мс, зарегистрированного гидрофоном 2, на расстоянии 1000 км. 1 – предвестник, 2 – отражение от катера. Уровень сигнала в относительных единицах.

излучения 1.7 мс на дистанции 1500 м. Заметим, что эти дистанции в полной мере соответствуют дальнему распространению сигнала. В наших экспериментах дальность распространения превышала вертикальный масштаб волновода в 500–750 раз. На рис. 11 показан результат компрессии широкополосного параметрического сигнала. Предвестник сигнала оказался в результате затухания не столь заметным, как на дистанции 1000 м, а сам сигнал длительностью 1.7 мс при распространении в мелководном волноводе (глубина вдоль трассы 2 м) на 1500 м сжался в импульс длительностью 0.4 мс. За этим импульсом видны отражения от катера, стоящего рядом с приемной антенной. Произошло сжатие сигнала по длительности более чем в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

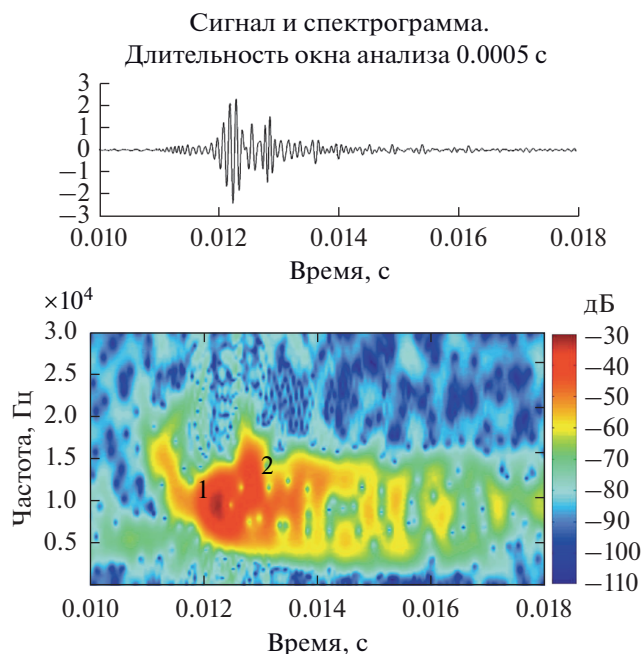


Рис. 11. Спектрограмма при компрессии сигнала длительностью 1.7 мс, зарегистрированного гидрофоном 2, на расстоянии 1500 км. 1 – предвестник, 2 – отражение от катера. Уровень сигнала в относительных единицах.

Сделанный расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в волноводе. 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, происходит компрессия сигнала. Анализ показывает, что условие одновременного прихода низкочастотных и высокочастотных составляющих определяется как длительностью излучения, так и дистанцией, на которой происходит такая компрессия сигнала. 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 распространения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

Выполненные эксперименты показывают возможность сжатия широкополосного акустического импульса в результате действия волноводной дисперсии при его 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.

Использованная в наших опытах частотная модуляция сигнала не соответствовала в полной мере характеру волноводной 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 1.5 км. Для достижения полного синхронизма прихода всех частотных составляющих сигнала необходима специальная частотная модуляция, соответствующая особенностям дисперсии скорости звука в волноводе. В таком случае, как показывают расчеты, в условиях эксперимента можно сжать сигнал в 10 раз.

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. В нашем случае затухание сигнала при его распространении в мелководном волноводе ограничивало дистанцию наблюдения эффекта компрессии сигнала.

Наиболее эффективно сжатие широкополосных сигналов возможно осуществить на достаточно протяженных трассах при одномодовом возбуждении волновода. Рассматриваемая здесь компрессия широкополосного сигнала является чисто линейной акустической процедурой. Однако, параметрическая антенна, действующая на принципах нелинейной акустики, 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 (проект 16-29-02003 и проект 17-02-00434).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
2. *Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., Tarasov S.P.* Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water // *Acoust. Phys.* 2009. V. 55. № 1. P. 76–80.
3. *Charnotskii M.I., Fuks I.M., Naugol'nykh K.A., Smirnov A.V., Di Iorio D., Esipov I.B.* An experimental test of the dual-frequency method for monitoring transverse currents // *Acoust. Phys.* 2006. V. 52. № 2. P. 222–226.
4. *Esipov I.B., Chernousov A.D., Popov O.E.* Determining the Spatial Properties of a Turbulent Transverse Flow via Multi-Frequency Acoustic Probing // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2018. V. 82. Is. 5. P. 470–475.
5. *Бреховских Л.М.* Океан и человек: Настоящее и будущее. М.: Наука, 1987.
6. *Muir T.G., Goldsberry T.G.* Signal processing aspects on nonlinear acoustics / In: *Underwater Acoustics and Signal Processing. Proceedings of the NATO advanced study institute / Denmark.* 1980. Edited by Bjorno L.
7. *Esipov I.B., Popov O.E., Kenigsberger G.V., Sizov I.I.* A parametric antenna for hydrophysical research on long-distance paths // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2016. V. 80. Is. 10. P. 1209–1217.
8. *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.
9. *Григорьев В.А., Кузькин В.М.* Управление фокусировкой поля в многомодовых плоскостойных волноводах // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 3. С. 352–359.
10. *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.
11. *Зверев В.А.* Принцип акустического обращения волн и голография // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
12. *Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C.* Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1998. V. 103. № 1. P. 25–40.
13. *Новиков Б.К., Тимошенко В.И.* Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1990, 256 с.
14. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.