

УДК 534.2

## РОЛЬ ДИСПЕРСИИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ

© 2020 г. И. Б. Есипов<sup>1,2, \*</sup>, О. Е. Попов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Акционерное общество “Акустический институт имени Н.Н. Андреева”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: igor.esipov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Рассматривается возможность повышения эффективности параметрической антенны при возбуждении акустических мод мелководного морского волновода. Показано, что при специальном выборе режима частотной модуляции может происходить полное сжатие распространяющихся в мелком море акустических сигналов с соответствующим ростом их интенсивности. Приведены результаты экспериментального исследования этого эффекта при распространении широкополосного акустического сигнала параметрической антенны в мелком море.

DOI: 10.31857/S0367676520060095

### ВВЕДЕНИЕ

Задача разработки новых акустических методов и средств исследования океана на протяженных трассах остается актуальной. Для ее решения необходимы методы, адаптивные к структуре океана. Один из таких методов основан на принципах нелинейной акустики с использованием направленного широкополосного параметрического излучения [1]. Параметрическая антенна 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 [2]. 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 параметрической антенны показывает, что она обеспечивает одномодовое возбуждение подводного звукового

канала [3]. 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, в акустической томографии морских акваторий с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [4, 5]. Л.М. Бреховских отмечал, что акустические характеристики параметрической антенны делают ее “идеальным инструментом для акустики океана” [6]. Сдерживает широкое применение параметрических антенн в практике морского эксперимента их невысокая эффективность. Величина акустической мощности излучения на единицу электрической мощности возбуждающего генератора у обычных акустических антенн существенно выше. Однако почти сразу с появлением параметрических антенн возникла дискуссия о возможности их конкуренции с традиционными гидроакустическими инструментами. Характер такой дискуссии частично отражен в [7]. В частности, там отмечается, что в условиях, когда существенна реверберация акустического сигнала

ла, узкий луч и отсутствие боковых лепестков в диаграмме направленности могут более чем возмещать низкие уровни излучения параметрической антенны. 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. В настоящей работе развивается идея повышения соотношения сигнал/шум при использовании параметрического излучения в условиях, когда дисперсия широкополосного акустического сигнала, распространяющегося в подводном волноводе, приводит к его сжатию и локальной концентрации его энергии в заданной области волновода.

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]. 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] обеспечивает одномодовое возбуждение подводного акустического волновода и 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 исследования особенностей распространения широкополосного параметрического излучения в подводном звуковом канале.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Особенностью параметрической антенны является чрезвычайно узкая диаграмма направленности ( $6^\circ$  – 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 воз-

буждение 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.

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 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 были расположены с шагом 0,3 м на металлической штанге. Эта штанга в составе жесткой конструкции была установлена на дне таким образом, что вертикальная цепочка гидрофонов перекрывала практически весь волновод. Еще два гидрофона крепились по бокам штанги для пеленгации направления прихода сигналов. 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. Такое распределение обеспечивало придонное распространение звука.

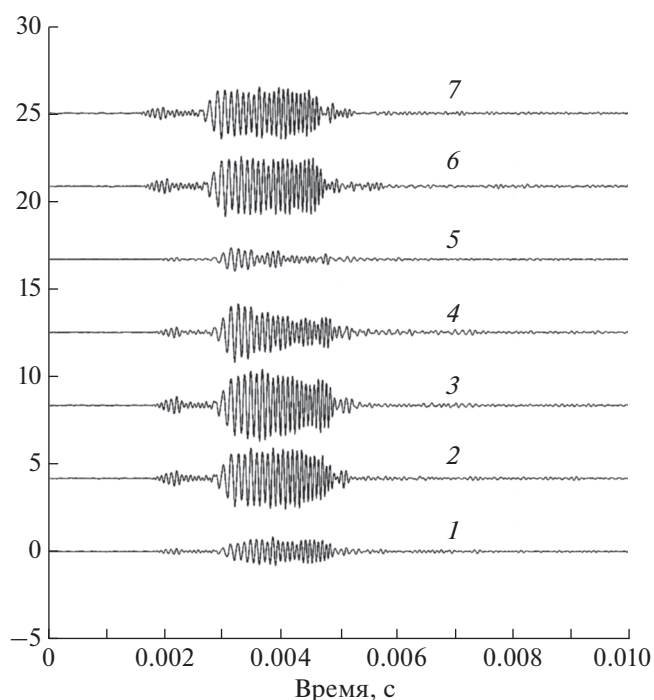
Измерения показали, что в диапазоне частот от 5 до 15 кГц направленность параметрического излучения практически не меняется и составляет  $10^\circ$  на уровне половинной мощности излучения. В вертикальной плоскости эта направленность еще выше из-за особенностей конструкции излучателя. Учитывая высокую направленность излу-

чения параметрической антенны, методику измерений осуществляли в режиме снятия диаграммы направленности, когда излучающая антенна медленно поворачивалась в горизонтальной плоскости. Максимум интенсивности принятых сигналов определяли на стационарно стоящей на дне вертикальной цепочке приемников. После этого излучались импульсы частотно-модулированных сигналов. Длительность импульса излучения меняли от 0.7 до 3 мс, интервал между импульсами около 300 мс. Сигналы регистрировали 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

Были исследованы 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, эффективность излучения параметрической антенны при этом падает. 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. 1 приведены осциллограммы акустических ЛЧМ-импульсов длительностью 3 мс, зарегистрированных гидрофонами приемной антенны на дистанции 1000 м. Видно, что поле параметрического излучения концентрировано 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.

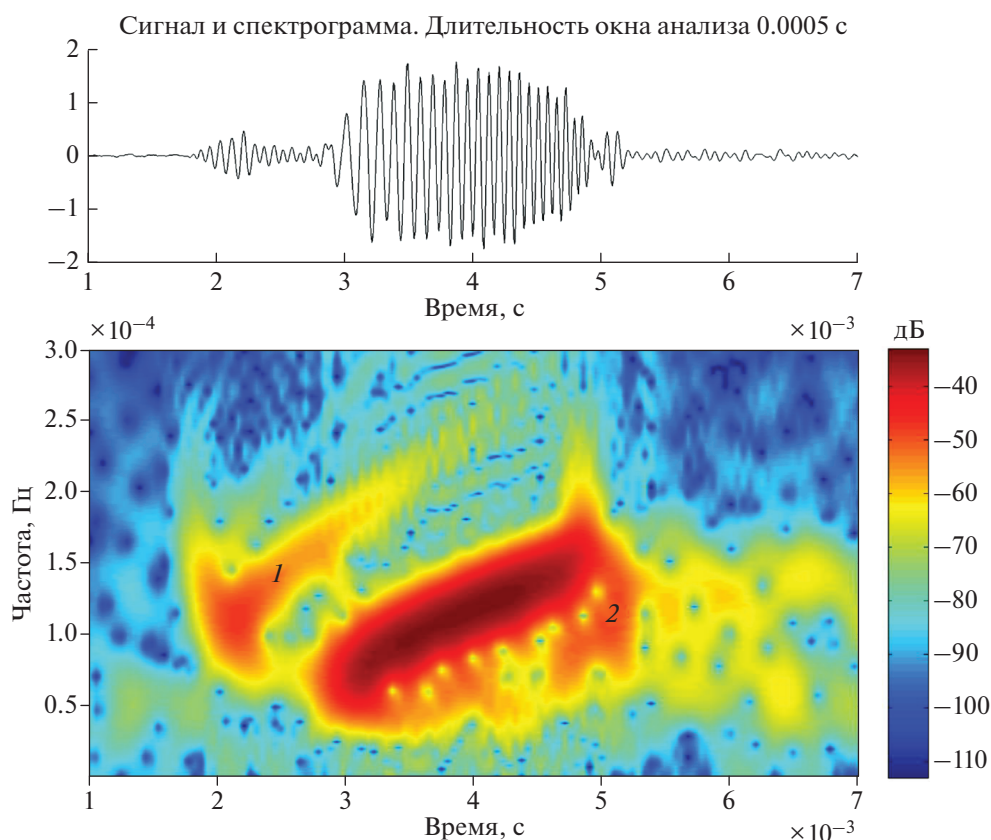
На осциллограммах видны типичные особенности, связанные с распространением импульса параметрического излучения в волноводе. В форме сигнала можно выделить предвестник, связанный с возбуждением второй гармоники основного сигнала, и собственно сам ЛЧМ-сигнал (рис. 2). При этом длительность ЛЧМ-сигнала при регистрации оказалась 2 мс, в то время как длительность излучаемого импульса была 3 мс. Длительность широкополосного сигнала сократилась на



**Рис 1.** Осциллограммы сигналов, зарегистрированных гидрофонами приемной антенны. Номера соответствуют порядковому номеру гидрофона согласно расстоянию от дна. Максимальный уровень сигнала регистрируется гидрофонами 2 и 3, что соответствует придонному распространению. Гидрофоны 6 и 7 установлены на уровне гидрофона 2 и обеспечивают измерение направления прихода сигнала.

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 частотной дисперсии скорости волноводного распространения звука в данных условиях можно было ожидать полной компрессии параметрического сигнала в выбранной частотной полосе при длительности 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. 3 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.



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

### ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

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

Таким образом, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в отношении  $T/\tau$  раз:

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

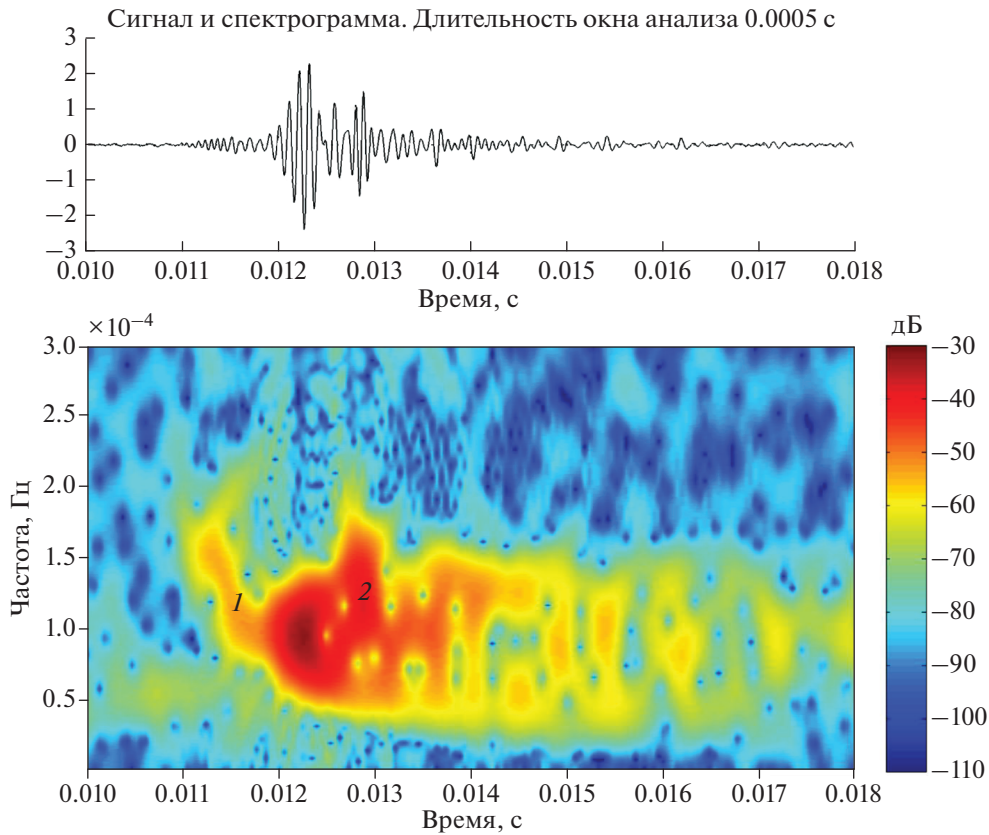
То есть эффект увеличения интенсивности пропорционален дистанции, на которую распространяется сигнал, величине волноводной дисперсии и квадрату частотной полосы сигнала. При этом увеличивается соотношение между сигналом

и шумом, который накапливается в регистрирующей аппаратуре за время приема сигнала  $\tau$ .

Заметим, что групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется параметрами волновода. В частности, для волновода Пекериса с постоянной, не зависящей от глубины скоростью распространения звука  $c_0$ , частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением:

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

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



**Рис. 3.** Спектрограмма при сжатии сигнала длительностью 1.7 мс, зарегистрированного гидрофоном 2, на расстоянии 1500 м. 1 – предвестник, 2 – отражение от катера. Уровень сигнала в относительных единицах.

волноводном распространении в мелком море на протяженных трассах.

Таким образом, длительность частотно-модулированного сигнала в процессе его распространения в волноводе уменьшается с расстоянием  $T(r) = T_0 - \Delta T$ , где  $T_0$  – начальная длительность сигнала, связанная, 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  $\Delta f$ , имеем

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

здесь  $R$  – пространственный масштаб, характерный для волноводного распространения,  $L$  – ди-

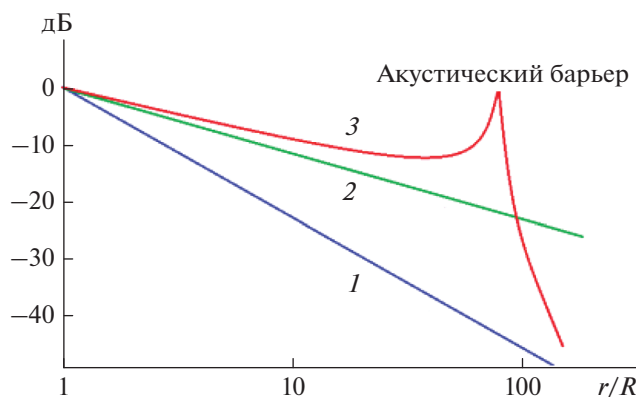
станция максимального сжатия сигнала,  $I_0$  – начальная интенсивность сигнала при входе в волновод.

Для широкополосного сигнала  $\tau/T_0 \ll 1$  относительная интенсивность  $I(r)/I_0$  достигает максимума при  $r = L$ . Максимум отношения  $I(r)/I_0$  зависит от дисперсионных свойств волновода и квадрата частотной полосы сигнала. Это отношение, согласно выражениям (1)–(3), можно определить как

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

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

На рис. 4 показано относительное изменение интенсивности частотно-модулированного сигнала в сравнении с типичными примерами сферического распространения сигнала в однородной среде или цилиндрическом распространении в идеальном волноводе. Видно, что интенсивность частотно-модулированного сигнала достигает максимума, образуя своеобразный акустиче-



**Рис. 4.** 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.

ский барьер, на котором достигается максимальное соотношение между интенсивностью сигнала параметрической антенны и шумом акватории. В этой области эффективность параметрической антенны достигает максимума. За этим барьером происходит быстрый спад интенсивности сигнала, поскольку его длительность начинает быстро увеличиваться в результате частотной дисперсии.

## 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.

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. Благодаря высокой направленности и нерезонансному способу генерации сигналов параметрическая антенна 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 слое 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 (проекты №№ 17-02-00434 и 20-02-00676).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Сузов И.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1340; *Esipov I.B., Popov O.E., Kenigsberger G.V., Sizov I.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. № 10. P. 1209.
2. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
3. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П.* // Акуст. журн. 2009. № 1. С. 56; *Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., Tarasov S.P.* // Acoust. Phys. 2009. V. 55. № 1. P. 76.
4. *Чарнотский М.И., Фукс И.М., Наугольных К.А. и др.* // Акуст. журн. 2006. № 2. С. 269; *Charnotskiĭ M.I., Fuks M., Naugol'nykh K.A. et al.* // Acoust. Phys. 2006. V. 52. № 2. P. 222.
5. *Есипов И.Б., Черноусов А.Д., Попов О.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 5. С. 53; *Esipov I.B., Chernousov A.D., Popov O.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 5. P. 470.
6. *Бреховских Л.М.* Океан и человек: Настоящее и будущее. М.: Наука, 1987. 287 с.
7. *Muir T.G., Goldsberry T.G.* Proc. of the NATO Adv. Study Inst. 1980. Kopenhagen: Leif Bjorno, 1980. P. 187.
8. *Кузькин В.М., Пересёлков С.А.* // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 693; *Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A.* // Acoust. Phys. 2006. V. 52. № 5. P. 598.
9. *Григорьев В.А., Кузькин В.М.* // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 352; *Grigor'ev V.A., Kuz'kin V.M.* // Acoust. Phys. 2005. V. 51. № 3. P. 292.
10. *Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S. et al.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 115. № 4. P. 1525.
11. *Зверев В.А.* // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792; *Zverev V.A.* // Acoust. Phys. 2004. V. 50. № 6. P. 685.
12. *Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C. et al.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 1. P. 25.
13. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Солдатов Г.В.* // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 490; *Esipov I.B., Popov O.E., Soldatov G.V.* // Acoust. Phys. 2019. V. 65. № 4. P. 391.
14. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.