

УДК 534.222

© И. Б. Есинов^{1,2,3}, С. П. Тарасов⁴, В. Л. Чулков⁵, 2014

¹Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва

²Акустический институт им. Н. Н. Андреева, Москва

³Научный совет по акустике РАН, Москва

⁴Южный Федеральный университет, факультет электроники и приборостроения, Таганрог

⁵Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Москва

tarasov@fep.tgn.sfedu.ru

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ АНТЕННА — ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКЕАНА НА ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ

Обсуждаются новые возможности для мониторинга океана на протяженных трассах, открывающиеся при согласовании сигнала, излучаемого параметрической гидроакустической антенной с частотными характеристиками морского волновода. Представлены результаты исследований, демонстрирующие одномодовое возбуждение волновода параметрической антенной в широкой полосе частот. Показана возможность сжатия широкополосного сигнала при его распространении в результате волноводной дисперсии, что приводит к росту интенсивности сигнала. Приводятся результаты экспериментальных исследований особенностей распространения широкополосного акустического сигнала параметрической антенны в мелком море. Рассматриваются перспективы применения параметрического узконаправленного излучателя для исследования характеристик морской среды.

Ключевые слова: параметрическая гидроакустическая антенна, широкополосный сигнал, волноводная дисперсия, сжатие широкополосного сигнала.

Исследование характеристик морской среды, обнаружение гидрофизических и техногенных неоднородностей и наблюдение за ними с помощью гидроакустических методов и средств является одними из основных в ряду дистанционных способов изучения Мирового океана. Трудоемкие и дорогостоящие методы определения свойств морской среды путем непосредственного измерения физических характеристик и их изменчивости все чаще заменяются более дешевыми и требующими меньших временных затрат дистанционными методами с возможностью проведения постоянного и периодического мониторинга.

Решение ряда задач гидроакустики, в том числе исследование характеристик морской среды, может быть более эффективным при использовании аппаратуры, действующей на принципах нелинейного взаимодействия акустических волн [1—3]. Так называемая параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот является одним из возможных акустических устройств, создающих условия для реализации подходов, повышающих эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море, либо в морском волноводе. Известны подходы, которые позволяют перенести принципы пространственной обработки сигналов в частотную область [4]. Указанные принципы можно реализовать при одномодовом режиме возбуждения морского волновода в широкой полосе частот (2—3 октавы). Именно параметрическая антенна может обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала в морском волноводе [5—6].

Практика применения параметрических антенн показывает, что с их помощью можно передавать широкополосный сигнал, наилучшим образом согласованный со слоистой структурой океанического волновода. Предварительные расчеты, которые были сделаны для осо-

бенностей применения параметрических антенн, показывают возможность управлять числом возбуждаемых мод сигнала.

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 гидрологических параметров холодного промежуточного слоя (вертикального распределения температуры и солености) 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 типичных 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. Поэтому широкополосные сигналы меняют свою форму в процессе распространения, и это изменение может быть экспериментально зафиксировано. Измерение групповой скорости позволит определить средний профиль скорости звука в подводном волноводе, что дополняет непосредственные измерения вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) по трассе.

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. Поскольку собственные функции волновода меняются в соответствии с особенностями профиля скорости распространения звука в волноводе, исследование его собственных функций в широкой полосе частот с помощью сигналов параметрической антенны может восстановить профиль скорости звука и обеспечить мониторинг океана на протяженных трассах.

На рис. 1 представлены результаты расчетов распространения сигнала параметрической антенны в характерных условиях черноморского волновода. Расчет сделан для излучения с вертикальной направленностью 2° , постоянной в диапазоне частот 300—1800 Гц, что типично для параметрической излучающей антенны. Видно, что морской волновод эффективно захватывает направленное излучение параметрической антенны. Этот рисунок иллюстрирует реальную возможность решать гидрофизические задачи на протяженных трассах. Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода [7]. 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 частотная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В таком случае можно говорить о том, что происходит фокусировка или сжатие акустического сигнала во времени [8].

Условия распространения в мелководном волноводе в нашем случае соответствуют 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.

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

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

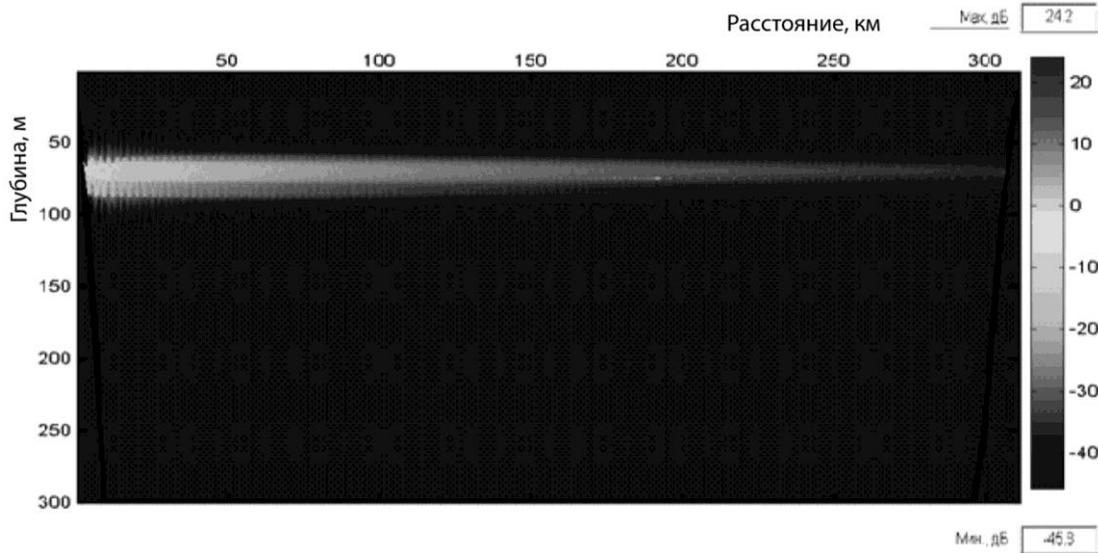


Рис.1. Относительная интенсивность акустического поля параметрической антенны вдоль трассы распространения длиной 300 км. 0 дБ соответствует интенсивности на дистанции 1 км.

Таким образом, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в T / τ 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 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:

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

где H — вертикальный масштаб волновода, n — номер моды. Откуда 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/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.

За область сжатия в результате дисперсии сигнал вновь увеличивает свою длительность с соответствующим снижением интенсивности. Протяженность области сжатия сигнала l , где интенсивность сигнала падает вдвое, можно оценить согласно выражениям (1)—(2) как

$$l = L \frac{\tau}{T}. \quad (4)$$

Несмотря на невысокие значения частотной дисперсии $\partial c/\partial f$, при достаточной полосе сигнала и протяженности трассы сигнал можно сжать в несколько десятков — до сотни раз с соответствующим увеличением интенсивности и ростом соотношения сигнал/шум. Это обстоятельство позволяет создавать в заданной части акватории за счет настройки частотной полосы сигнала акустические барьеры с повышенной интенсивностью сигнала, где чувствительность мониторинга повышается на 15—20 дБ.

Явления волноводной дисперсии и сжатия широкополосного сигнала в морском волноводе были экспериментально исследованы на примере распространения акустических волн в условиях мелкого моря.

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 от -90° до $+90^\circ$ 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—20 кГц. Электрическая мощность усилителя антенны была 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. 2).

Учитывая высокую направленность излучения параметрической антенны, методика излучения сигнала осуществлялась 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 выполнены при расстояниях между излучателем и приемной антенной 1—5.6 км.

Исследовались частотно-временные характеристики распространения импульсов длительностью 2 мс с заполнением, частота которого имела линейную модуляцию 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.

Частотно-временной спектр параметрического сигнала, зарегистрированного на дистанции 466 м, показан на рис. 3.

На рис. 4 показаны осциллограммы акустических сигналов, 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 линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал. Как видно из рис. 3, предвестник связан с существованием в сигнале гармонических составляющих. Предвестник на частоте 14 кГц бежит быстрее частотной составляющей на частоте 7 кГц. Гармоники на частотах выше 15 кГц отфильтровывались системой регистрации.

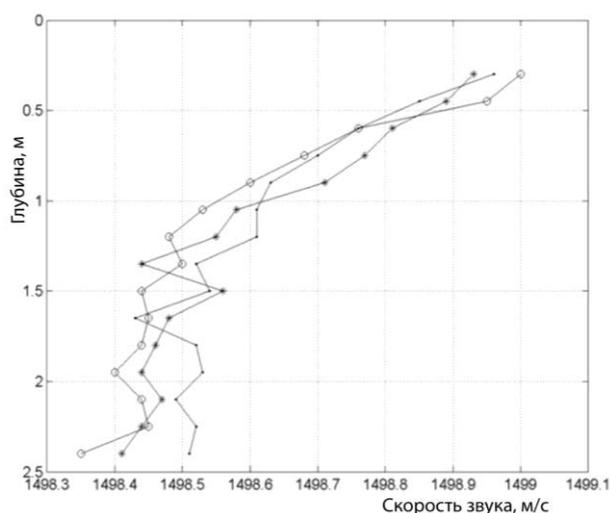


Рис. 2. Три профиля скорости звука в волноводе, измеренные с интервалом через час.

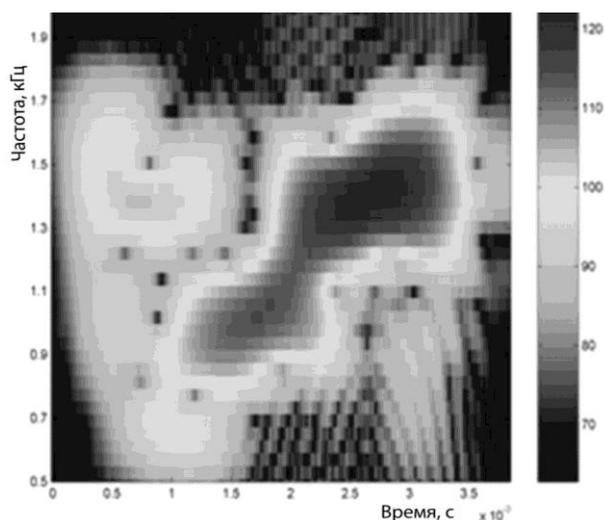


Рис. 3. Частотно-временной спектр параметрического сигнала на дистанции 466 м.

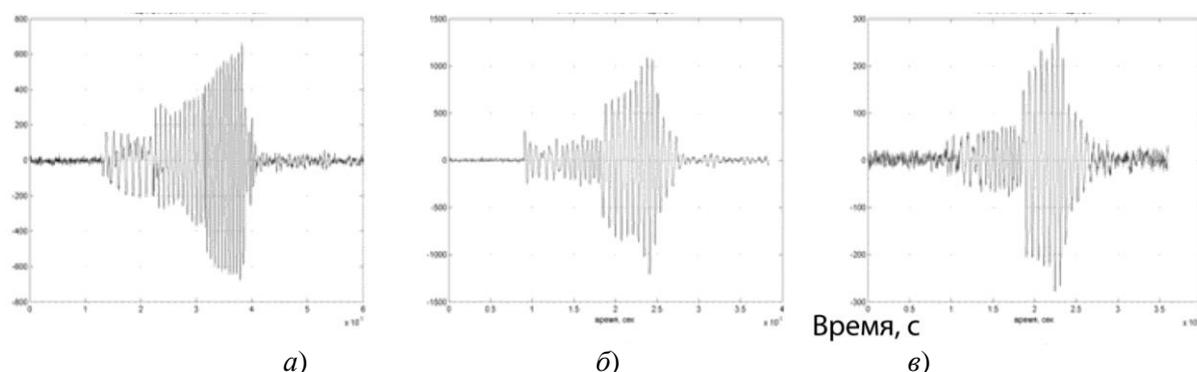


Рис. 4. Осциллограммы ЛЧМ сигнала, распространяющегося в мелководном волноводе (четвертый гидрофон): *а* — расстояние 1 км; *б* — 2.5 км; *в* — 3.8 км. По оси ординат — условные единицы (милливольты в системе регистрации сигнала).

На рис. 5 приведено экспериментально измеренное нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода (обозначено точками) и результаты расчета собственной функции первой моды (сплошная кривая) 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, в условиях эксперимента параметрическая антенна возбуждала первую моду волновода. 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. Такие параметры типичны для песчаного дна Азовского моря. 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 распространение сигнала можно характеризовать как одномодовое.

Расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в мелководном волноводе. На рис. 6 показаны зависимости такой задержки для различных дистанций, пройденных сигналом. Как видно, наклон дисперсионной кривой для ЛЧМ сигнала хорошо соответствует частотно-временной обработке сигнала, измеренного на дистанции 1590 м. С увеличением дистанции меняются частотно-временные соотношения в сигнале. Растет задержка низкочастотных составляющих сигнала, что соответствует сокращению его длительности. Анализ показывает, что время прихода низкочастотных и высокочастотных составляющих может совпасть на дистанции приблизительно в 6 км для условий настоящего эксперимента. Поскольку дисперсия скорости распространения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

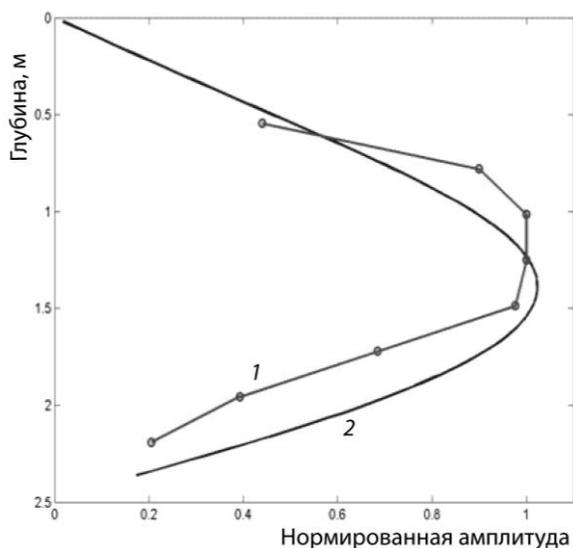


Рис. 5. Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода (1) и расчет первой моды (2).

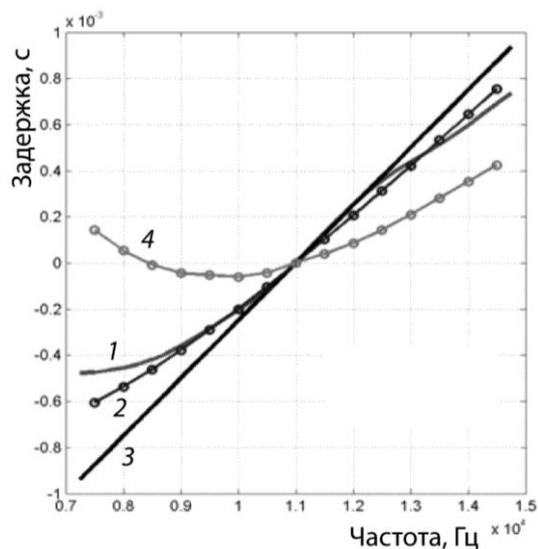


Рис. 6. Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала. Результаты эксперимента на дистанции 1590 м (1) и расчета: 2 — 1590 м; 3 — ЛЧМ 0.002 с; 4 — 6000 м.

Использованный в наших опытах ЛЧМ сигнал не соответствовал 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 3.8 км. Для достижения полного синхронизма прихода всех частотных составляющих необходима специальная частотная модуляция, соответствующая особенностям дисперсии скорости звука в волноводе.

Таким образом, параметрическая антенна в силу своих особенностей к селективному возбуждению мод волноводов в широкой полосе частот представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в океанических волноводах и проведения мониторинга океана на протяженных трассах.

Полученные результаты позволили сформулировать требования к разработке полномасштабного экспериментального образца параметрической антенны для дистанционного зондирования морских акваторий на протяженных трассах. Внешний вид разработанной для этих целей параметрической антенны и многоканальной системы усиления электрических сигналов для ее возбуждения показан на рис. 7.



Рис. 7. Гидроакустическая параметрическая антенна для мониторинга океана на протяженных трассах. Слева — 24 канальный усилитель мощности антенны.

Этот новый инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, предоставляет возможность проводить исследования на протяженных трассах в широкой полосе частот при одномодовом волноводном распространении. С помощью разработанной параметрической антенны предполагается организовать стационарные акустические трассы для исследования гидрофизических характеристик Черного моря. Разработанная мощная параметрическая антенна находится в Сухумском гидрофизическом институте для испытаний на Черном море. Ее возможности позволяют исследовать гидрофизические характеристики Черноморского полигона в акватории от кавказских берегов Черного моря до Крыма на трассах, протяженностью свыше 500 км.

Разработанная параметрическая антенна имеет частоту накачки 20 кГц, что позволяет наиболее эффективно излучать параметрический сигнал в частотной полосе 300—3000 Гц. Основные размеры антенны 2 м (высота) × 0.7 м (ширина) обеспечивают узкую характеристику направленности шириной на уровне 0.7 по давлению 2° в вертикальной плоскости и 8° в горизонтальной плоскости, постоянную во всем частотном диапазоне. Антенна рассчитана на работу в импульсном режиме с импульсами регулируемой длительности до 100 мс.

Антенна накачки разработанной параметрической антенны состоит из 144 пьезокерамических преобразователей, которые сгруппированы в 12 отдельных блоков, установленных горизонтально в антенне (рис. 7). Каждый блок может возбуждаться на двух различных частотах накачки с помощью отдельных усилителей. Поэтому система усилителей накачки состоит из 24 независимых блоков усиления выходной электрической мощностью по 6 кВт каждый.

Формирователь сигналов накачки представляет собой специальный 24 канальный программируемый цифровой генератор, который обеспечивает электронное сканирование диаграммой в вертикальной плоскости. Сканирование необходимо для согласования возбуждаемой моды с гидрофизическими особенностями морского волновода.

Изменение направления излучения в горизонтальной плоскости обеспечивается механическим блоком вращения, который может контролируемым образом управлять поворотом антенны с точностью 0.1°.

Для разработанной и изготовленной параметрической антенны был выполнен теоретический анализ и проведены расчеты особенностей распространения сигнала параметрической антенны в условиях океанического волновода.

Примеры результатов расчетов акустического поля параметрической антенны с частотой накачки 20 кГц, излучающей за счет нелинейного взаимодействия в водной среде сигнала

лы с рабочими (разностными) частотами в диапазоне 300—3000 Гц, с направленностью 2° в вертикальной плоскости и 8° — в горизонтальной плоскости, постоянной во всем частотном диапазоне, приведены на рис. 8, 9. Здесь демонстрируется распространение сигнала высоконаправленной параметрической антенны вдоль трассы длиной 20 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости составляет 0° (рис. 8) и 5° (рис. 9). Результаты этого моделирования показывают, что в условиях Черного моря параметрический излучатель, установленный на глубине 10—15 м, то есть вне волновода, может достаточно эффективно возбуждать морской волновод. Заметна разница в структуре акустического поля, вызванная условиями возбуждения океанического волновода, обусловленными различием углов наклона характеристики направленности параметрической антенны к оси волновода.

В ходе испытаний и экспериментальных исследований были определены условия согласования излучения параметрической антенны с волноводом, определены энергетические характеристики излучения антенны, исследована возможность передачи сложного сигнала в условиях океанического волновода.

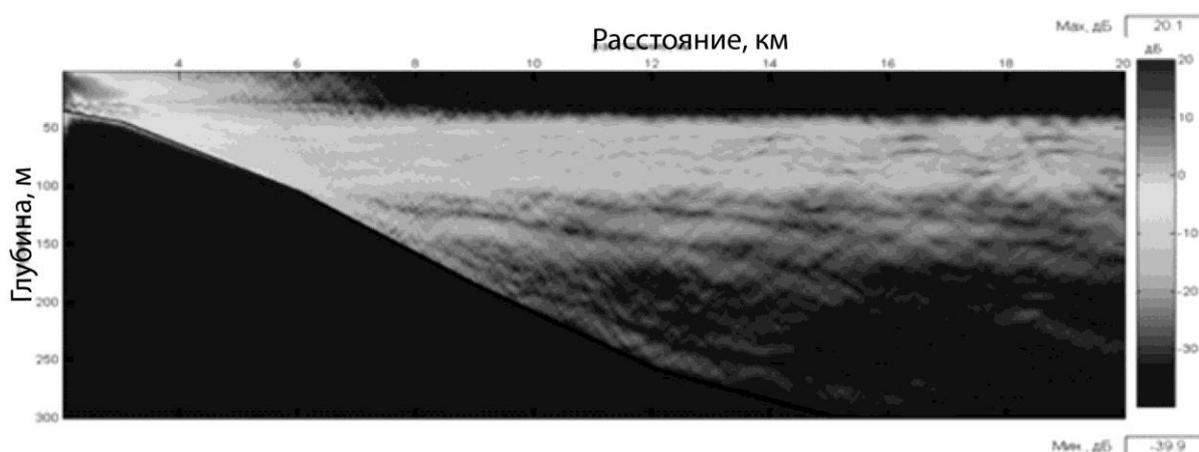


Рис. 8. Относительная интенсивность акустического поля параметрической антенны вдоль трассы распространения длиной 20 км. 0 дБ соответствует уровню на дистанции 1 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости 0° .

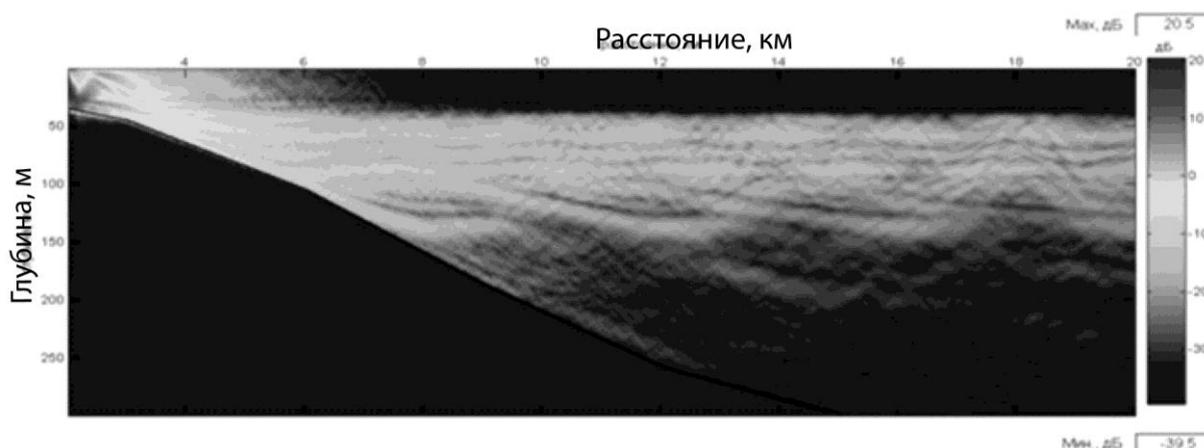


Рис. 9. Относительная интенсивность акустического поля параметрической антенны вдоль трассы распространения длиной 20 км. 0 дБ соответствует уровню на дистанции 1 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости 5° .

Предварительные эксперименты, выполненные в морских условиях на дистанции до 2 км, позволили определить приведенный уровень параметрического излучения сигнала разностной частоты. На частоте 1 кГц он оказался равным 205 дБ относительно 1 мкПа·м. Рас-

четы показывают, что низкочастотные сигналы такого уровня могут обеспечить эффективное зондирование морской среды на дистанциях сотни километров в условиях волноводного распространения. При этом приведенный уровень излучения накачки на частоте 20 кГц составил 2.5×10^6 Па·м или 248 дБ относительно 1 мкПа·м.

Моделирование условий применения параметрической антенны, оптимальной для излучения акустического сигнала в диапазоне частот 100—400 Гц в условиях Баренцева моря, указывает на принципиально новые возможности гидроакустических методов освещения подводной обстановки на обширных мелководных акваториях. На рис. 10 показаны профиль волновода и типичное распределение скорости звука по трассе Новая Земля—Шпицберген, протяженностью 1048 км.

Условию распространения сигнала в таком волноводе соответствует интегральная дисперсия, вид которой показан на рис. 11. На этом рисунке представлены задержки времени распространения первой моды от частоты сигнала в диапазоне частот 100—400 Гц.

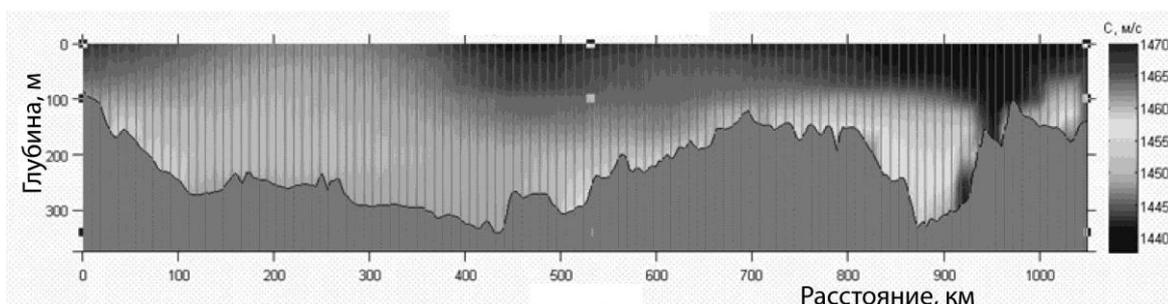


Рис. 10. Типичная гидрология волновода Баренцева моря на трассе Новая Земля—Шпицберген.

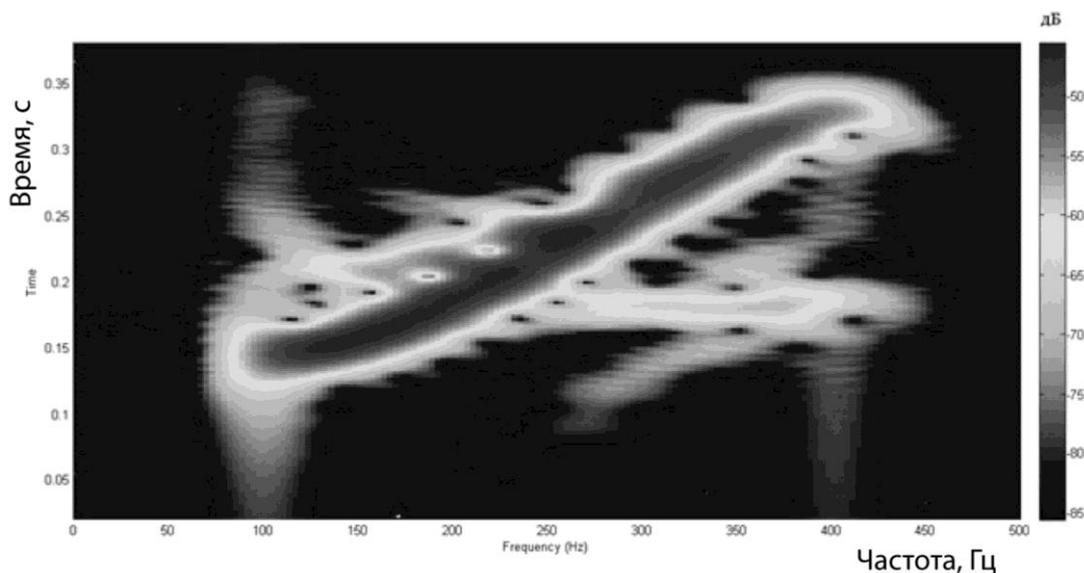


Рис. 11. Зависимость времени распространения сигнала от частоты в волноводе на трассе Новая Земля—Шпицберген.

Как показывает моделирование, время распространения по этой трассе сигнала частоты 100 Гц приблизительно на 0.2 с меньше времени распространения сигнала частоты 400 Гц (рис. 12, а). Поэтому, применяя специальную частотную модуляцию излучаемого акустического сигнала длительностью 0.2 с, когда сигнал начинается с излучения волн высокой частоты (400 Гц), постепенно снижаясь до 100 Гц через 0.2 с, можно получить полную синхронность прихода волн разных частот после распространения по этой трассе. В результате тако-

го синхронного прихода длинный сигнал сворачивается в короткий импульс длительностью, определяемой частотной полосой сигнала (рис. 12, б). В данном примере длительность такого импульса составляет около 350 мс, что в 60 раз меньше длительности излучаемого сигнала. При модуляции, согласованной с частотной дисперсией волновода, происходит сжатие сигнала с соответствующим ростом отношения сигнал/шум.

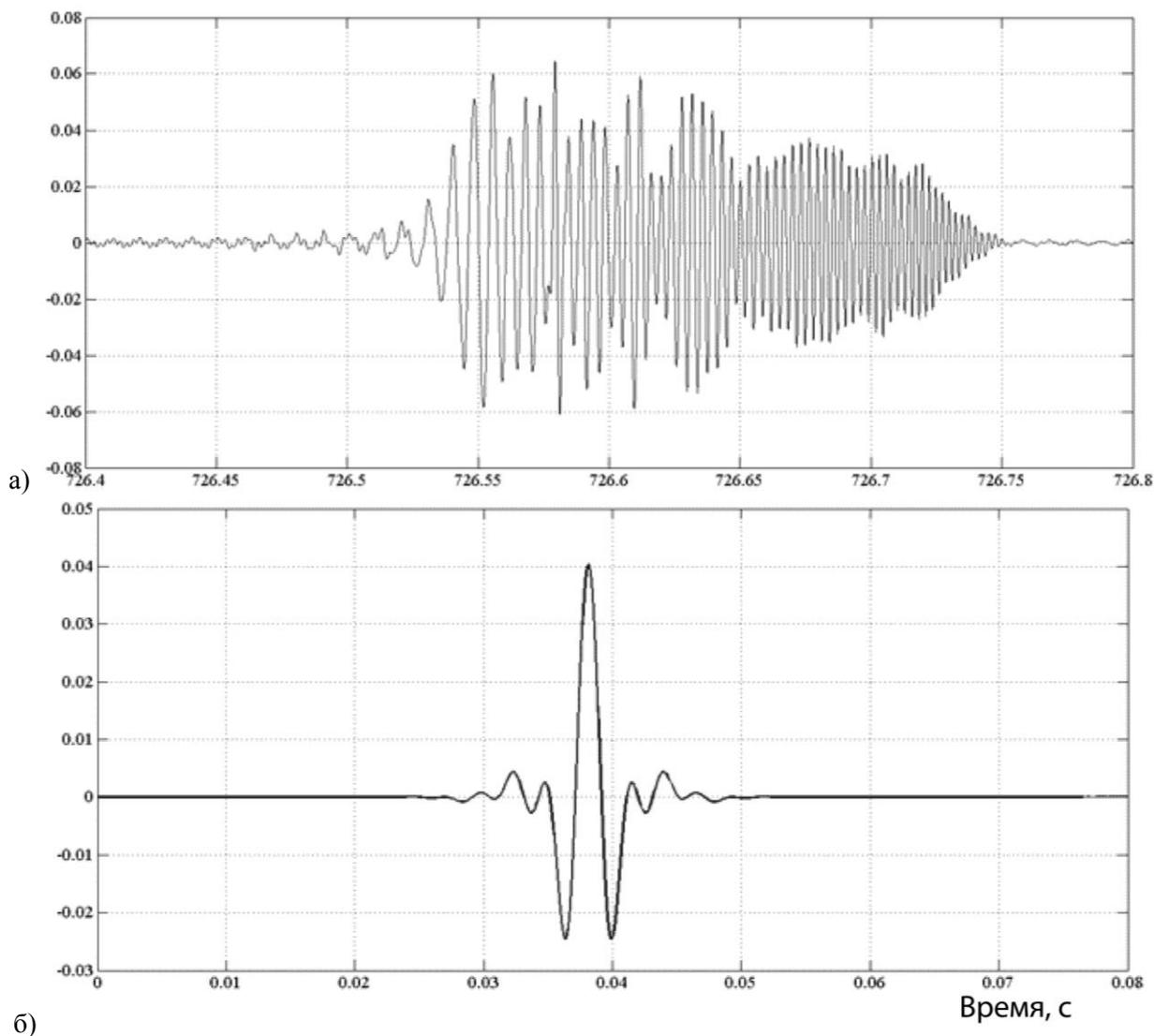


Рис. 12. Прохождение сигнала разных частот по трассе Новая Земля—Шпицберген.

а — акустический импульс с обращенной во времени частотной модуляцией;

б — акустический импульс, соответствующий сжатию сигнала.

По оси ординат — уровень сигнала в относительных единицах.

Эта новая возможность концентрировать энергию излучения на больших дистанциях позволяет создавать удаленные виртуальные рубежи, на которых с высоким соотношением сигнал/шум осуществляется гидроакустическое зондирование. Такая возможность реализуется с помощью параметрической антенны, которая, благодаря острой характеристике направленности, позволяет селективно возбуждать волновод в широкой полосе частот.

Области применения высоконаправленной мощной широкополосной излучающей параметрической антенны стационарного типа могут быть достаточно разнообразны.

Параметрическая антенна, благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот, может быть перспективным инструментом, способным предоставить исследователю новые возможности для акустического зондирования в океане, особенно в морском

волноводе. Высокая направленность параметрического излучения позволяет применить эту антенну для исследования характеристик самого морского волновода. В частности, для определения профиля скорости звука в подводном звуковом канале наиболее информативной является дисперсия нижних мод. Обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала идеально согласованного со слоистой структурой морской среды в волноводе удастся путем использования методов нелинейной гидроакустики.

С применением широкополосных сигналов для исследования океана открывается возможность для развития нового подхода акустической томографии морских акваторий, в частности для определения скорости поперечных течений с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [9].

Другой областью возможных применений высоконаправленной широкополосной параметрической антенны является обнаружение и пеленгование неоднородностей и объектов на просветных трассах, а также для задач дальней звукоподводной связи, навигации и управления движением автономных подводных аппаратов. Передвигаясь в пределах узкого луча излучающей параметрической антенны малоразмерные автономные подводные аппараты, оборудованные соответствующими гидроакустическими приемниками, могут по типу принципа равносигнальной зоны направляться лучом вдоль заданной траектории. Дальность управления по такому принципу может достигать десятков и даже сотен километров.

Одним из перспективных направлений в повышении эффективности гидроакустической локации является переход от моностатического принципа к локации бистатической и далее — к полистатической. Как мы выяснили, параметрическая излучающая антенна, согласованная с морским волноводом, может создавать в заданных районах исследуемой акватории акустические барьеры с повышенной интенсивностью зондирующего сигнала, создавая тем самым пространственно ограниченные зоны подсветки. Сканируя акваторию параметрическим излучением, можно последовательно освещать области пространства и тем самым снижать уровень помех, обусловленных реверберацией и попаданием на приемные антенны прямых сигналов источника подсветки.

Таким образом, излучающая параметрическая антенна, согласованная с морским волноводом, в силу своих особенностей открывает возможность методам нелинейной акустики включить в гидроакустическую практику частотную область волновода. Это новое качество создает дополнительные возможности для мониторинга морских акваторий на протяженных трассах. Селективное возбуждение мод в широкой полосе частот в волноводах представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в океанических волноводах, реализации виртуальных акустических барьеров, построения систем подводной навигации и управления движением малоразмерных автономных подводных аппаратов, создания высокоэффективных систем зондирования океана с целью обнаружения погруженных объектов и неоднородностей.

Исследования выполнены при поддержке МНТЦ (nr. 3770), РФФИ (nr. 13-02-90300) и Минобрнауки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 г.») ГК № 14.518.11.7068. Компьютерное моделирование выполнено с использованием программы расчета волновых полей RPMS (автор К. В. Авилов).

Литература

1. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
2. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 400 с.
3. Воронин В. А., Кузнецов В. П., Мордвинов Б. Г., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. 448 с.

4. 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.
5. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Parametric Array Signal Dispersion in Shallow Water // Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, Sweden, 7—10 July 2008. P. 393—396.
6. 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. 55(1). P. 76—80.
7. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
8. 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.
9. Fuks I., Charnotskii M., Naugolnykh K. A multi-frequency scintillation method for ocean flow measurement // J. Acoust. Soc. Am. 2001. 109(6). P. 2730—2738.



Статья поступила в редакцию 24.06.2013 г.

I. B. Esipov^{1,2,3}, S. P. Tarasov⁴, V. L. Chulkov⁵

¹Gubkin Oil and Gas University, Moscow

²Andreyev Acoustics Institute, Moscow

³Scientific Council on Acoustics of RAS, Moscow

⁴Southern Federal University, Taganrog

⁵Defense Problem Section RAS, Moscow

The Parametric Hydroacoustic Array — the Perspective Technology for Ocean Monitoring on Extended Routes

The new abilities for long range ocean monitoring arising with underwater parametric array application are discussed. The results of single mode waveguide excitation in broad frequency band are presented. The effect of broadband single mode signal compression due to waveguide dispersion that leads to signal intensity increase in process of it propagation is shown. The results of the experimental research of specific features propagation of broadband sound signal generated by parametric array in shallow water are discussed. Some prospective of sharp directed parametric array application for marine environment research is considered.

Key words: parametric underwater array; broadband signal; waveguide dispersion; compression of the wide frequency band signal.