

С.П. Тарасов

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

Рассматриваются вопросы исследования характеристик морской среды с целью оценки экологического состояния океана. Акцентируется внимание на использование методов нелинейной акустики и применении параметрических антенн. Рассматриваются результаты исследования морского дна и донных осадков с помощью параметрического профилографа. Использование технологий нелинейной гидроакустики позволяют получить сведения об экологическом состоянии среды на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения экологического мониторинга. Обсуждаются результаты изучения обратного объемного рассеяния параметрических сигналов. Параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения, одинаковой в широкой полосе частот, создает условия для реализации подходов, повышающих эффективность акустического зондирования в океане. Обсуждаются новые возможности для экологического мониторинга океана на протяженных трассах, открывающиеся при применении параметрических гидроакустических антенн. 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.

Параметрическая гидроакустическая антенна; широкополосный сигнал; волноводная дисперсия; сжатие широкополосного сигнала.

S.P. Tarasov

THE POSSIBILITIES OF NONLINEAR ACOUSTICS FOR OCEAN ECOLOGY MONITORING TESTING

Discussed are the issues of studying the characteristics of the marine environment for assessing the ecological state of the ocean. The focus is on using the methods of nonlinear acoustics and the use of parametric antennas. Discussed are the results of a study of the seabed and sediments with the help of parametric profilograph. The use of a nonlinear hydroacoustics technology allows you to obtain information about the ecological state of environment on quite large areas and significantly reduce the time of carrying out environmental monitoring. Discussed are the results of a study of volume backscattering parametric signals. Parametric antenna due to a high radiation direction, in the same wide frequency band, creates the conditions for the implementation of approaches increasing the efficiency of acoustic sensing in the ocean. The new possibilities for ocean monitoring on long lines, appearing when using the parametric hydroacoustic arrays, are discussed. Represented are the results of the studies, which demonstrate the one-mode excitation of waveguide in the broadband of the parametric arrays. Shown is the possibility of compressing the wide-band signal with its propagation as a result of waveguide dispersion, that leads to intensity growth. The results of the studies showing one-mode excitation of a waveguide by the parametric array in a wide frequency band are presented. The results of experimental researches of features of propagation of a parametrical broadband signal in shallow water are presented. The prospects of application of a parametrical narrowly directed radiator for research of characteristics of the sea environment are considered.

Parametric hydroacoustic array; broadband signal; waveguide dispersion; compressing of the wide-band signal.

Введение. Одной из наиболее актуальных задач акустики океана является проблема изучения экологического состояния Мирового океана.

Современные тенденции изменения экологического состояния внутренних водоемов, а также морской водной среды с учетом непрерывного появления все более и более мощных загрязнителей без преувеличения можно назвать угрожающими, особенно в прибрежных мелководных районах. Как известно, именно в зоне шельфа обитает преобладающее большинство видов морской фауны. В то же время эта зона наиболее интенсивно используется для добычи углеводородных ресурсов. Попадающая в воду нефть образует на поверхности воды пленку, препятствующую проникновению кислорода, и оказывает вредное воздействие на морские организмы. Под действием нефтяного загрязнения у планктонных микроскопических водорослей замедляется темп деления клеток, некоторые виды теряют способность к размножению и погибают. Одной из основных причин загрязнения гидросферы является сброс сточных вод. Не последнее место в числе загрязнителей занимает современное сельское хозяйство по количеству и ассортименту различного рода потребляемых химических веществ. С полей они попадают в реки, а затем в моря. Под влиянием загрязнителей изменяется в худшую сторону биологический состав обитателей водоемов.

Водные бассейны обладают удивительной способностью самоочищаться, в результате чего, благодаря бактериям и осаждению на дно, постепенно исчезают вредные примеси. Однако, запасы прочности, которыми природа наделила большие водоемы, не безграничны. Необходимо непрерывно следить за процессом опасного загрязнения и своевременно реагировать на него.

Морская вода, содержащая пузырьки, твердые взвеси, фазовые включения биологического происхождения: зоо- и фитопланктон, продукты распада биологических систем, а также рыбу и другие морские организмы различного размера является особо сложной средой. Такие неоднородности морской среды приводят к рассеянию звука, дополнительному затуханию, дисперсии скорости звука, появлению дополнительной нелинейности среды, а также к изменению целого ряда других акустических характеристик, важных для проведения исследований и измерений в акустике океана.

Не менее важна задача регистрации дистанционным методом газовых пузырьков в воде или пелены пузырьков, появление которых обусловлено техногенными процессами или катастрофами. Например: утечка газа вследствие аварий на газопроводах, участки которых проложены по дну морей, рек, озер и других водоемов.

Поскольку неоднородности в океане имеют различную природу, они обладают и различными свойствами в отношении рассеяния акустических волн. В частности, сила обратного объемного рассеяния зависит от частоты зондирующего сигнала.

Большой научный и практический интерес представляет вопрос влияния особенностей приповерхностного слоя, в частности, изменяющегося параметра нелинейности на процесс распространения и нелинейного взаимодействия акустических волн.

Постановка задачи. Наряду с другими гидроакустическими средствами, гидроакустические системы, использующие эффект нелинейного взаимодействия волн, так называемые параметрические системы, позволят поднять науку об океане на качественно более высокий уровень. Эффективность применения параметрических антенн обусловлена особенностями, присущими только этому классу приборов. Это – широкополосность, высокая направленность, одинаковая во всем частотном диапазоне, малогабаритность при излучении низких частот, малый уровень бокового поля.

Нелинейные взаимодействия различного ряда волн в океане являются перво-причиной некоторых процессов, рассмотрение которых невозможно в рамках линейной теории. Так, поверхностные волны, взаимодействуя друг с другом, порождают инфразвуковые волны в океане и атмосфере. Взаимодействия поверхностных и внутренних волн эффективно изменяют спектральный состав тех и других. Нелинейные взаимодействия интенсивных звуковых волн положили начало созданию параметрических излучателей и приемников с уникальными характеристиками [1, 2].

Наиболее изученными в настоящее время являются процессы нелинейного искажения интенсивных звуковых волн [3–9], их взаимодействия друг с другом, а также вопросы распространения звука в случайно-неоднородных средах [10–15].

Исследование характеристик морской среды с целью оценки экологического состояния океана, обнаружение гидрофизических и техногенных неоднородностей и наблюдение за ними с помощью гидроакустических методов и средств является одним из основных в ряду дистанционных способов изучения Мирового океана.

Решение ряда задач исследования характеристик морской среды может быть более эффективным при использовании аппаратуры, действующей на принципах нелинейного взаимодействия акустических волн [1, 8, 16, 17]. Так называемая, параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот создает условия для реализации подходов, повышающих эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море, либо в морском волноводе.

Энергетические характеристики параметрических гидролокационных систем дистанционного зондирования неоднородностей в океане рассчитываются в соответствии с методикой, разработанной на основе решения уравнения гидролокации [16]. Методика может быть использована при решении задач построения гидролокационных систем экологического мониторинга и диагностики водной среды в океане.

Расчетное соотношение для вычисления коэффициента обратного объемного рассеяния при измерениях с помощью параметрических гидролокационных систем получено в виде:

$$\alpha_{op} = \frac{2\delta^2 \cdot P_{no}^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{0,05\beta c\tau} \cdot \gamma_{изл} \cdot \rho_0 \cdot c^5}{F^4 \cdot \pi^2 \cdot \tau_2 \cdot \gamma_{пр} \cdot P_{01}^2 \cdot P_{02}^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot L_d^2 \cdot e^{-2x/L_z} \cdot I^2(B, y) \cdot \eta_{op}},$$

где δ – отношение сигнал-помеха; P_{no} – уровень шумовой помехи; τ – длительность излучаемого сигнала; ε – параметр нелинейности; $L_3 = 1/\beta$; F – разностная частота;

$$\Omega = 2\pi F; \quad I_1(B, y) = \int_0^y \frac{\exp(-z) dz}{d + yzB + i(z - y)}, \quad y = \frac{x}{l_3}; \quad d = \frac{L_D}{l_3}; \quad B = \frac{L_D l_3}{l_{D1} l_{D2}}; \quad L_D = \frac{a^2 \Omega}{4c_0};$$

$l_{D1}, l_{D2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$ – длина зоны дифракции волн накачки; P_{01}, P_{02} – амплитуды давления волн накачки у поверхности антенны; a – апертура излучателя накачки; $\gamma_{пр}, \gamma_{изл}$ – коэффициент осевой концентрации для приемной и излучающей антенн.

Выражение позволяет определить коэффициент обратного объемного рассеяния по измеренной амплитуде рассеянного сигнала, точнее – по отношению сигнал/помеха.

Используя экспериментальные данные измерений, сделанных в Индийском океане [18], рассчитаны распределения по глубине коэффициента обратного объемного рассеяния. Исследования проводились с помощью параметрического гидролокатора. Частота накачки составляла 150 кГц, разностная частота была 20 кГц.

Размеры (диаметры) круглых антенн накачки параметрического излучающего тракта и приемной антенны были равными и составляли 0,3 м. Длительность зондирующего импульса при измерениях 1 мс, уровень приведенных шумовых помех 0,005 Па.

Значения отношения сигнал/помеха использовались в качестве исходных данных для вычисления зависимости коэффициента обратного объемного рассеяния от глубины рассеивающего объема. На рис. 1 приведены расчеты для коэффициента рассеяния на частоте 20 кГц.

Характер зависимости отличается большим числом флюктуаций коэффициента рассеяния, обусловленных, по-видимому, присутствием в рассеивающем объеме дискретных рассеивателей резонансного типа, например мелких пузырьных рыб. Разработанная методика позволяет производить расчеты в широком диапазоне частот и по экспериментально полученным частотным зависимостям уровня эхо-сигнала вычислять частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния с заданного горизонта океана.

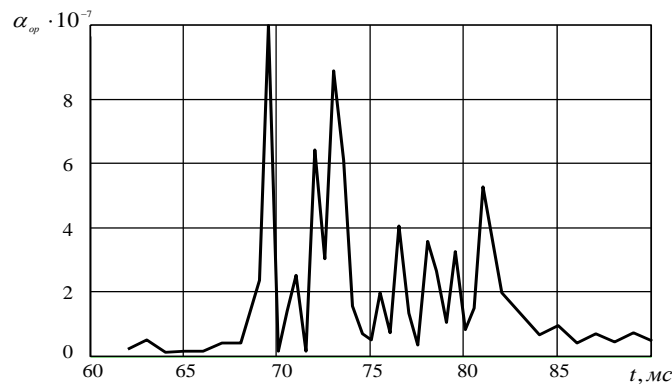


Рис. 1. Зависимость коэффициентов объемного рассеяния от глубины на частоте 20 кГц

По полученным уровням эхо-сигнала вычислены частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния, представленные на рис. 2.

Для расчета использовались те же самые параметры антенн и сигналов, как и в эксперименте: частота накачки $f_0 = 150$ кГц, ширина характеристики направленности в режиме излучения 2^0 , в режиме приема – изменяется в соответствии с частотой от 8^0 до 30^0 , длительность импульса 1 мс, полоса пропускания приемного тракта – 40 кГц.

Частотные характеристики коэффициента обратного объемного рассеяния (рис. 2) имеют достаточно плавно спадающую, с небольшими флюктуациями, зависимость от частоты, в диапазоне (20–30) кГц.

На этих частотах рассеяние звука обусловлено, по-видимому, нерезонансными рассеивателями, главным образом, животными, имеющими твердый скелет и панцирь. Более резкие флюктуации наблюдаются в низкочастотной области. В частности, максимумы в районе 12 и 18 кГц, по-видимому, соответствуют резонансным частотам мелких пузырьных рыб, присутствующих в слое. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее [17].

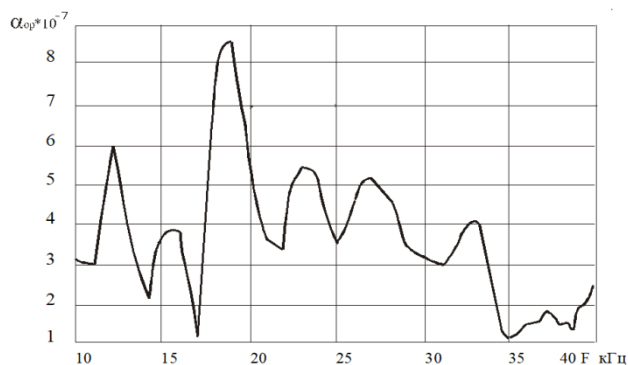


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента объемного рассеяния в океане с горизонта 35 м

Одна из идей экологического мониторинга водных объектов связана с использованием биоаккумуляции вредных веществ. Поскольку концентрация токсичных веществ в биоорганизмах иногда увеличивается во много раз, можно, проведя химический анализ, например, мидий, поглощающих токсичные вещества, следить за содержанием последних в воде. Другой подход предполагает контроль состава и характеристик донных осадков, существенно определяющих экологическое состояние водной среды, морей и внутренних водоемов.

Для целей экологического мониторинга наиболее удобным и перспективным по многим критериям представляется гидроакустический комплекс, в состав которого входит гидролокатор бокового обзора и параметрический профилограф. Метод профилирования донных осадков с целью экологического контроля может представлять собой комплексное исследование акватории с помощью контактных и дистанционных методов.

Исследуемая площадь покрывается сеткой галсов судна, на борту которого установлена аппаратура гидролокаторов бокового обзора и параметрического профилографа. В результате исследований должна быть получена своеобразная карта дна исследуемого района в виде панорамы дна и вертикальных разрезов, которая позволит оценить структуру, тип, состав донных осадков, определить их изменчивость и экологическое состояние.

Исходя из этого, берутся пробы донного грунта с помощью геологических трубок, которые подвергаются подробному физико-химическому анализу. Анализ физических свойств осадков проводится как на основе исследований акустических характеристик и путем прямого анализа свойств проб грунта.

Использование технологий гидроакустических исследований с помощью параметрического профилографа позволяет получить сведения об экологическом состоянии среды на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения экологического мониторинга. На рис. 3 представлены профилограмма донных осадков и панорама донной поверхности в одном из районов Черного моря.

Представленные результаты демонстрируют возможности использования разработанной методики для определения экологического состояния мелководных районов шельфа и внутренних водоемов.

Одним из направлений, повышающих эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море, является решение проблемы фокусировки акустического излучения в морском волноводе [19–21]. В то же время известны подходы, которые позволяют перенести известные принципы пространственной

обработки сигналов в частотную область [22]. 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 [23, 24] является одним из возможных акустических устройств, создающих условия для реализации этих подходов.

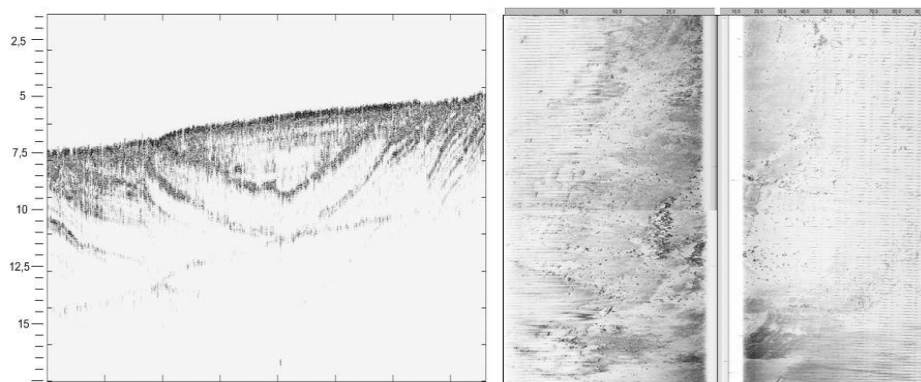


Рис. 3. Профилограмма донных осадков и панорама поверхности дна. Черное море

Перспективы применения нелинейной гидроакустики и широкополосных сигналов для исследования океана заключаются в том, что открывается возможность для развития нового подхода акустической томографии морских акваторий с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [25].

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 солёности на трассе протяженностью в сотни километров параметров холодного промежуточного слоя 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. 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.

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.

Таким образом, исследование собственных функций волновода в широкой полосе частот может восстановить профиль скорости звука и обеспечить мониторинг океана на протяженных трассах.

С помощью параметрической антенны можно продемонстрировать новые акустические технологии зондирования морской среды на принципах нелинейной акустики, благодаря возможности возбуждать одномодовый акустический сигнал в широкой полосе частот, в нашем случае, в полосе 300–3000 Гц. Результаты моделирования искажения формы сигнала при его распространении по трассе длиной от 1 км до 500 км показаны на рис. 4,а. Короткий акустический импульс возбуждался на первой моде волновода в частотной полосе 200–1200 Гц. Как видно на рис. 4,б сигнал остается еще коротким на дистанции 1 км (длительность импульса менее 5 мс), но на дистанции 500 км длительность импульса около 80 мс с выраженной частотной модуляцией.

В результате волноводной дисперсии широкополосный сигнал параметрической антенны меняет свою длительность в 16 раз с соответствующим изменением интенсивности. Применяя согласованную с волноводом частотную модуляцию, можно получить концентрацию акустической энергии и создать акустический барьер, локальную область с повышенной интенсивностью сигнала [26].

Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода. 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.

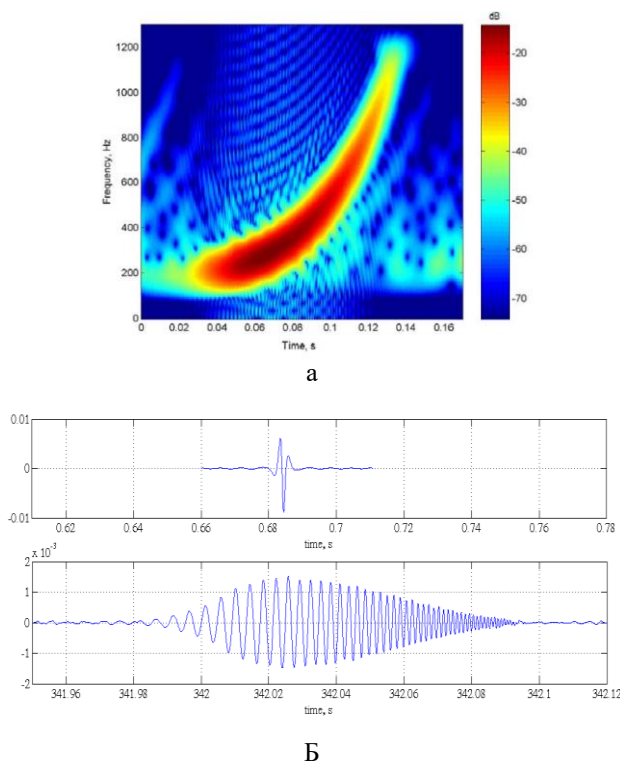


Рис. 4. Частотная дисперсия на трассе 500 км (а). Первая мода Черноморского волновода (б). Сигнал на дистанции 1 км – верхний рисунок и 500 км – нижний

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 $\partial c / \partial f$ скорости распространения звуковой волны c :

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

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

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

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 за время приема сигнала τ .

Групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется параметрами волновода. В частности, для волновода Пекериса с постоянной, независящей от глубины скоростью распространения звука c_0 , частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением:

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

где H – вертикальный масштаб волновода, l – 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 $\Delta f / f = const$ оказывается, что относительное сжатие сигнала T / τ увеличивается с увеличением дистанции распространения сигнала L . Поэтому наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала получается при волноводном распространении на протяженных трассах.

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 параметрическая антенна, с другого судна обеспечивалась работа приемной антенны. 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. Средняя частота излучения (частота накачки) была 150 кГц. Разностная частота или частота излучения сигнала лежала в диапазоне 5 кГц – 20 кГц. Приемная антенна была выполнена в виде вертикальной цепочки восьми гидрофонов, которые располагались с шагом 0,25 м на металлической штанге.

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. Сигналы, зарегистрированные разными гидрофонами приемной антенны, оказываются в фазе по всей глубине волновода, что

свидетельствует о преимущественно одномодовом режиме распространения сигнала. 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 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 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.

Для дистанционного исследования основных гидрологических и гидрофизических характеристик океана была разработана мощная параметрическая гидроакустическая антенна.

Примеры результатов расчетов акустического поля параметрической антенны с частотой накачки 20 кГц, излучающей за счет нелинейного взаимодействия в водной среде сигналы с рабочими (разностными) частотами в диапазоне от 300 Гц до 3000 Гц, с направленностью 2 град. в вертикальной плоскости и 8 град. – в горизонтальной плоскости, постоянной во всем частотном диапазоне, приведены на рис. 7.

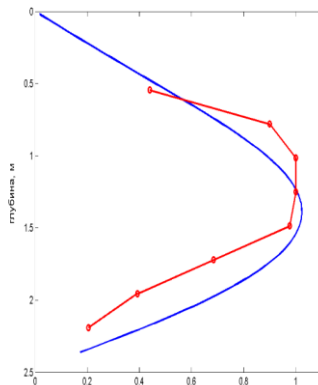


Рис. 5. Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода и расчет первой моды

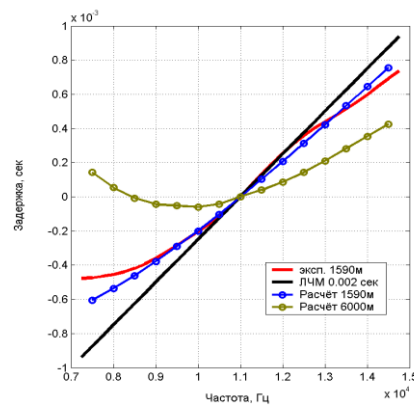


Рис. 6. Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала. Результаты эксперимента и расчета

Демонстрируется распространение сигнала высоконаправленной параметрической антенны вдоль трассы длиной 20 км.

Выводы. Области применения высоконаправленной мощной низкочастотной параметрической антенны стационарного типа могут быть достаточно разнообразны.

Высокая направленность параметрического излучения позволяет применить эту антенну для исследования характеристик самого морского волновода. Обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала идеально согласованного со слоистой структурой морской среды в волноводе удастся путем использования методов нелинейной гидроакустики.

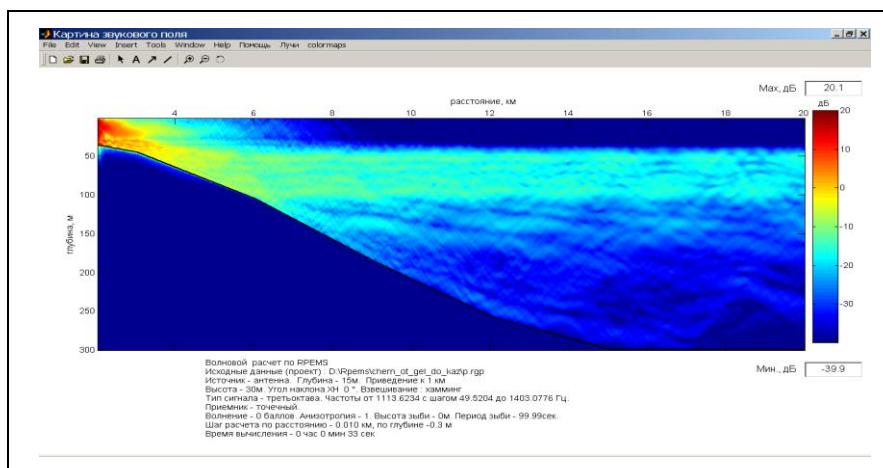


Рис. 7. Интенсивность акустического поля параметрической антенны вдоль трассы распространения длиной 20 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости 0 град.

Таким образом, параметрическая антенна, в силу особенностей селективного возбуждения мод в волноводах, представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в океанических волноводах, проведения мониторинга океана на протяженных трассах, создания высокоэффективных систем зондирования океана с целью экологического контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. – М.: Физматлит, 2010. – 264 с.
3. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
4. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
5. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
6. Зарембо Л.К., Тимошенко В.И. Нелинейная акустика. – М.: МГУ, 1984. – 104 с.
7. Зарембо Л.К. Акустическая излучающая параметрическая антенна // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128. – Вып. 4. – С. 713.
8. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.
9. Кузнецов В.П. О некоторых приложениях теории взаимодействия волн // Доклады Академии наук СССР. – 1985. – Т. 284, № 5. – С. 1089-1092.

10. Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. – М.: Наука, 1975.
11. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
12. Рытов С.М., Крайцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
13. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – 280 с.
14. Kaufman C. Scattering of Sound by underwater turbulence // JASA. – 1971. –Vol. 49, No. 3 (2). – P. 930.
15. Goodman L., Kemp K. Scattering from volume variability // J. Geophys. Res. – 1981. – Vol. 86, No. C5. – P. 4083.
16. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
17. Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тимошенко В.И. Акустические океанологические исследования и экспедиции. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. – 544 с.
18. Тарасов С.П., Воронин В.А. Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 78-92.
19. Fuks I., Charnotskii M., and Naugolnykh K. A multi-frequency scintillation method for ocean flow measurement // J. Acoust.Soc. Am. – 2001. – Vol. 109 (6). – P. 2730-2738.
20. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 264 с.
21. Пономарев А.Е., Булатницкий С.И., Сапожников О.А. Компрессия и усиление ультразвукового импульса, отраженного от одномерной слоистой структуры // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, No. 2. – С. 157-167.
22. Чарнотский М.И., Фукс И.М., Наугольных К.А., Смирнов А.В., Ди Йоржо Д., Есипов И.Б. Экспериментальная проверка акустического двухчастотного метода мониторинга поперечных течений // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52, № 2. – С. 269-274.
23. Esipov Igor B., Tarasov Sergey P., Voronin Vasily A. and Popov Oleg 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.
24. Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., and Tarasov S.P. Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water // Acoust. Phys. – 2009. – Vol. 55 (1). – P. 76-80.
25. Есипов И.Б., Тарасов С.П., Чулков В.Л. Параметрическая гидроакустическая антенна – перспективный инструмент для мониторинга океана на протяженных трассах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 46-57.
26. Тарасов С.П., Солдатов Г.В., Пивнев П.П., Есипов И.Б., Овчинников О.Б., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В. Параметрическая антенна для гидрофизических исследований на протяженных трассах // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 92-94.

REFERENCES

1. Voronin V.A., Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nelineynye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [NS and parametric Acoustic processes in the ocean]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2007, 448 p.
2. Kuznetsov V.P. Nelineynaya akustika v okeanologii [Nonlinear acoustics in Oceanography]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 264 p.
3. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. Vvedenie v nelineynuyu akustiku [Introduction to nonlinear acoustics]. Moscow: Nauka, 1966, 519 p.
4. Rudenko O.V., Soluyan S.I. Teoreticheskie osnovy nelineynoy akustiki [Theoretical foundations of nonlinear acoustics]. Moscow: Nauka, 1975, 287 p.
5. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear underwater acoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.

6. Zarembo L.K., Timoshenko V.I. Nelineynaya akustika [Nonlinear acoustics]. Moscow: MGU, 1984, 104 p.
7. Zarembo L.K. Akusticheskaya izluchayushchaya parametricheskaya antenna [Acoustic radiating parametric antenna], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 1979, Vol. 128, Issue 4, pp. 713.
8. Novikov B.K., Timoshenko V.I. Parametricheskie anteny v gidrolokatsii [Parametric antenna in sonar]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 256 p.
9. Kuznetsov V.P. O nekotorykh prilozheniyakh teorii vzaimodeystviya voln [Some applications of the theory of interaction of waves], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1985, Vol. 284, No. 5, pp. 1089-1092.
10. Chernov L.A. Volny v sluchayno-neodnorodnykh sredakh [Waves in randomly inhomogeneous media.]. Moscow: Nauka, 1975.
11. Tatarskiy V.I. Rasprostranenie voln v turbulentnoy atmosfere [Wave propagation in a turbulent atmosphere]. Moscow: Nauka, 1967, 548 p.
12. Rytov S.M., Kravtsov Yu.A., Tatarskiy V.I. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku [Introduction to statistical Radiophysics]. Part 2. Sluchaynye polya [The random field]. Moscow: Nauka, 1978.
13. Isimaru A. Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh [Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media]. Moscow: Mir, 1981, 280 p.
14. Kaufman C. Scattering of Sound by underwater turbulence, *JASA*, 1971, Vol. 49, No. 3 (2), pp. 930.
15. Goodman L., Kemp K. Scattering from volume variability, *J. Geophys. Res.*, 1981, Vol. 86, No. C5, pp. 4083.
16. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy [Parametric sonar system]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2004, 400 p.
17. Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Timoshenko V.I. Akusticheskie okeanologicheskie issledovaniya i ekspeditsii [Acoustic Oceanographic research and expedition]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2002, 544 p.
18. Tarasov S.P., Voronin V.A. Perspektivy primeneniya metodov nelineynoy akustiki v tekhnologiyakh gidroakusticheskogo poiska [Prospects of application of methods of nonlinear acoustic sonar technology in the search], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 78-92.
19. Fuks I., Charnotskii M., and Naugolnykh K. A multi-frequency scintillation method for ocean flow measurement, *J. Acoust.Soc. Am.*, 2001, Vol. 109 (6), pp. 2730-2738.
20. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana [Theoretical foundations of ocean acoustics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 264 p.
21. Ponomarev A.E., Bulatnitskiy S.I., Sapozhnikov O.A. Komplessiya i usilenie ul'trazvukovogo impul'sa, otrazhennogo ot odnomernoy sloistoy struktury [Compression and amplification of an ultrasonic pulse reflected from one dimensional layered structure], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 2007, Vol. 53, No. 2, pp. 157-167.
22. Charnotskiy M.I., Fuks I.M., Naugol'nykh K.A., Smirnov A.V., Di Iorio D., Esipov I.B. Eksperimental'naya proverka akusticheskogo dvukhchastotnogo metoda monitoringa poperechnykh techeniy [Experimental verification of the acoustic two-frequency method of monitoring transverse currents of the river], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 2006, Vol. 52, No. 2, pp. 269-274.
23. Esipov Igor B., Tarasov Sergey P., Voronin Vasily A. and Popov Oleg 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*, pp. 393-396.
24. Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., and Tarasov S.P. Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water, *Acoust. Phys.*, 2009, Vol. 55 (1), pp. 76-80.
25. Esipov I.B., Tarasov S.P., Chulkov V.L. Parametricheskaya gidroakusticheskaya antenna – perspektivnyy instrument dlya monitoringa okeana na protyazhennykh trassakh [Parametric sonar antenna is a promising tool for monitoring the ocean on extended lines], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 46-57.

26. Tarasov S.P., Soldatov G.V., Pivnev P.P., Esipov I.B., Ovchinnikov O.B., Popov O.E., Kenigsberger G.V. Parametricheskaya antenna dlya gidrofizicheskikh issledovaniy na protyazhennykh trassakh [Parametric antenna for hydrophysical researches on extended lines], *Trudy XIII Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki* [Proceedings of XIII all-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics]. Saint-Petersburg, 2016, pp. 92-94.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Каевицер.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp-47@mail.ru; 347922, пер. Некрасовский, 44; тел./факс: 88634361126; д.т.н.; профессор; заведующий кафедрой электрогидроакустической и медицинской техники.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; 347922, Nekrasovskiy lane, 44; tel./fax: 88634361126; dr. of eng. sc.; professor, head of department electrohydroacoustical and medical technology.

УДК 581.1

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-50-62

И.А. Кипнис, Ю.М. Вернигоров

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА УРОВНЕЙ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СИСТЕМАХ НА ПРОДВИЖЕНИЕ ВОДЫ

Анализ математической модели продвижения воды в многоуровневом криволинейном капилляре показывает, что в многоуровневых капиллярных системах с криволинейными боковыми капиллярами распределение воды в ветвях не одинаково. Наибольшее продвижение воды происходит в ветвях самого нижнего уровня. Абсолютная величина продвижения воды изменяется в зависимости от количества уровней в системе, расстояния между ними и параметров математической функции, описывающей кривизну ветви капилляра. В многоуровневых криволинейных капиллярах уменьшение расстояния между уровнями приводит к увеличению продвижения воды в каждой из криволинейных боковых ветвей. В вертикальном капилляре многоуровневой системы криволинейных капилляров наличие боковых ветвей приводит к увеличению подъема воды по сравнению с одиночным вертикальным капилляром того же радиуса. Высота подъема воды в вертикальном капилляре системы при прочих равных условиях остается одинаковой независимо от вида боковых ветвей. В криволинейных капиллярных системах продвижение воды в капиллярах высших уровней относительно капилляра первого уровня больше по сравнению с прямолинейными капиллярами тех же уровней. Абсолютная величина продвижения воды в прямолинейных боковых ветвях зависит от угла их наклона к горизонтали, от количества уровней в системе и расстояния между ними. В криволинейных боковых ветвях абсолютная величина продвижения воды зависит от количества уровней в системе, расстояния между ними, и кривизны ветви. В рассмотренных многоуровневых капиллярных системах проявляется следующая, присущая всем рассмотренным капиллярным системам особенность распределения в них воды. Фигура, образованная при соединении воображаемой линией, связывающей между собой водные мениски в капиллярных ветвях и в вертикальном капилляре, напоминает специфическую форму дерева или листа. Это подтверждает предположение о том, что своей специфической формой растения обязаны наличию в них капиллярных систем.

Многоуровневый криволинейный капилляр; ветвь, ксилема; транспирация; растение; модель.