

2. *Мюрр Т. Дж.* Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков. – В кн. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – С. 227-273.
3. *Душенин Ю.В.* Исследование нелинейного взаимодействия акустических волн для оценки экологического состояния донных водонасыщенных осадочных сред. // Тезисы докладов XXI молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – М.: МГАТУ, 1995. – № 5. – С. 31.
4. *Душенин Ю.В., Рыбачек М.С.* Возбуждение акустических волн параметрической излучающей антенной в неконсолидированных средах // Известия ТРТУ. – 1997. – № 1 (4). – С. 114-118.
5. *Душенин Ю.В., Нагучев Д.Ш., Рыбачек М.С.* К возможности применения параметрических излучателей в приборах медицинской ультразвуковой диагностики // Известия ТРТУ. – 1998. – № 4 (10). – С. 157-158.
6. *Барник В.Р., Вендт Г., Каблов Г.П., Яковлев А.Н.* Гидролокационные системы вертикального зондирования дна / Под ред. А.Н. Яковлева. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1992. – 218 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.П. Заграй.

Душенин Юрий Владимирович – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: dyv-dsp@tgn.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634312350; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Гурский Вадим Витальевич – e-mail: dsp@tgn.sfedu.ru; начальник научно-исследовательского сектора; к.т.н.

Dushenin Yuri Vladimirovich – SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational Autonomous Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: dyv-dsp@tgn.sfedu.ru; 22, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634312350; head of research and development laboratory.

Goorskey Vadim Vital'evich – e-mail: dsp@tgn.sfedu.ru; head of research and development sector; cand. of eng. sc.

УДК 534.2

И.Б. Есипов, И.И. Сизов, С.П. Тарасов

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОЛИГОНЕ*

Приводятся результаты предварительных испытаний мощной параметрической антенны на полигоне Сухумского гидрофизического института. Этот новый экспериментальный акустический инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, предназначен для волноводных исследований в море основных гидрофизических характеристик в полосе частот 0,3–3 кГц. Чрезвычайно узкая направленность излучения акустических сигналов во всем частотном диапазоне (2° в вертикальной плоскости, 8° – в горизонтальной) согласуется с условием селективного возбуждения мод черноморского волновода в этой полосе частот. Показано, что первая мода широкополосного акустического сигнала в черноморском волноводе может быть сжата более чем в 25 раз с соответствующим ростом интенсивности при распространении на дистанцию более 500 км. Особенности

* Исследование было выполнено при поддержке Международным научно-техническим центром (проект МНТЦ 3770) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ 13-02-90300).

характеристик этой антенны позволяют решить ряд задач, связанных с дистанционным исследованием гидрологии. Обсуждается программа дистанционного мониторинга Черного моря на протяженных трассах, включая трассу Сухум (Абхазия) – Кацивели (Крым). Эта программа предусматривает исследование сезонных изменений частотной дисперсии черноморского волновода и мониторинг холодного промежуточного слоя в Черном море. Морской волновод; одномодовая дисперсия; моды волновода.

I.B. Esipov, I.I. Sizov, S.P. Tarasov

PARAMETRIC ARRAY AS A NEW ACOUSTICAL TECHNOLOGY FOR REMOTE OCEANOGRAPHY RESEARCH AT BLACK SEA RANGE

Results of preliminary test of the developed parametric array both and the first program of remote marine environment monitoring in the Black sea are presented there.

New experimental tool operating on principals of nonlinear acoustics for waveguide marine research of the main hydrographical features (current, temperature, salinity) in frequency band of 300–3000 Hz has been developed. Extremely narrow directivity pattern (2° angular resolution) for low frequency acoustical signals perfectly fits for single mode waveguide excitation in the whole frequency band. Investigation shows that single mode wide frequency band acoustical signal in the Black sea waveguide could be compressed more than 25 times at the range of 500 km with proper intensity amplification. Specific features of the array could solve a number of problems related to remote oceanographic data research using a technique with such extreme parameters. We discuss there the program of remote monitoring of the Black sea at the elongated paths, for example Sukhum(Abkhazia) – Katsevely(Crimea). This program includes the research of seasonal variation of frequency dispersion of the Black sea waveguide both and a problem of cold intermediate layer parameters inversion by means of sharp directed wide frequency band acoustical parametrical signals.

Marine waveguide; single mode dispersion; waveguide modes.

Параметрическая антенна (ПА) формируется в среде при коллинеарном взаимодействии интенсивных звуковых волн, так называемой накачки. ПА достаточно известна, как инструмент для профилирования донных структур. Особенностью ПА является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (обычно несколько градусов углового разрешения) для низкочастотных сигналов [1]. Эффективная ширина диаграммы остается постоянной в широком диапазоне частот. ПА отличается от обычных антенн относительно небольшими размерами (размер излучающей апертуры $0.7\text{м}\times 2\text{м}$ в нашем случае), широкой частотной полосой излучаемого сигнала (300–3000 Гц) и острой характеристикой направленности ($2^\circ\times 8^\circ$) во всем частотном диапазоне. Практика применения ПА показывает, что они обеспечивают одномодовое возбуждение подводного звукового канала в широкой полосе частот [2, 3]. Применение широкополосных сигналов открывает 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 [4]. Известны примеры применения параметрической антенны для зондирования океана на дистанциях до 1000 км [5, 6]. Л.М. Бреховских отмечал, что акустические характеристики ПА делают ее “идеальным инструментом для акустики океана” [7]. Цель этой работы – обсудить возможности гидроакустической антенны, действующей на принципах нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах применительно к гидрологическим условиям Черного моря.

Черноморский волновод формируется верхним теплым слоем воды и холодным промежуточным слоем (ХПС), поэтому мониторинг толщины волновода может предоставить весьма ценную информацию о запасе тепла в этом регионе. Ско-

рость распространения звука прямо связана с температурой воды. Особенности вертикального профиля распределения скорости в волноводе определяют частотную дисперсию скорости распространения мод волновода. Поэтому по данным частотной дисперсии морского волновода можно определить интегральные характеристики вертикального профиля распределения скорости в волноводе. В данной работе мы предполагаем обсудить вопросы, связанные с возможностью восстановить параметры ХПС с помощью направленного широкополосного излучения сигналов параметрической антенны.

Технические характеристики параметрической антенны. Новый экспериментальный инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики (параметрическая антенна) для гидрофизических исследований на трассах, протяженностью более 500 км был создан в результате выполнения проекта #3770 Международного научно-технического центра. Эта параметрическая антенна была разработана специально для дистанционного исследования на Черноморском полигоне основных гидрологических характеристик (течения, температура, соленость). Данный инструмент предоставляет возможность проводить исследования на протяженных трассах в широкой полосе частот при одномодовом волноводном распространении. Созданный образец параметрической антенны расположен в Сухумском гидрофизическом институте. С его помощью предполагается организовать стационарные акустические трассы для исследования гидрофизических характеристик Черного моря. Предварительные экспериментальные исследования и моделирование показывают, что данная параметрическая антенна может обеспечить одномодовое возбуждение волновода в условиях Черного моря. Поэтому применение параметрической антенны в условиях Черного моря позволит продемонстрировать новые возможности в гидрофизических исследованиях с использованием широкополосных одномодовых сигналов.

Этот экспериментальный инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, 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 острую диаграмму направленности (приблизительно 2° в основном лепестке), постоянную во всем частотном диапазоне. Антенна рассчитана на работу в импульсном режиме с импульсами регулируемой длительности до 100 мс. Предварительные эксперименты, выполненные в морских условиях на дистанции 50 м – 2 км, позволили определить приведенный уровень параметрического излучения 205 дБ относительно 1 мкПа*м на частоте 1кГц. Приведенный уровень излучения накачки на частоте 20 кГц оказался при этом $2.5 \cdot 10^6$ Па*м или 248 дБ относительно 1 мкПа*м. Расчеты показывают, что сигналы такого уровня могут обеспечить эффективное зондирование морской среды на дистанциях 500–700 км в условиях Черного моря.

Высокая направленность параметрического излучения позволяет применить эту антенну для исследования характеристик Черноморского волновода. Дело в том, что параметрическая антенна может обеспечить возбуждение в волноводе широкополосного одномодового сигнала, идеально согласованного со слоистой структурой морской среды. Поэтому этот экспериментальный инструмент делает возможным исследовать волноводную дисперсию скорости распространения моды в диапазоне частот 300–3000 Гц на трассах более 500 км длиной. До сих пор такие исследования на протяженных трассах в широкой полосе частот были практически невозможны.



Рис. 1. Общий вид экспериментальной модели параметрической антенны для дистанционных исследований

Разработанная модель ПА состоит из 144 пьезо-керамических преобразователей, которые сгруппированы в 12 отдельных блоков, установленных горизонтально в антенне (рис. 1). 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 6 кВт каждый. Для возбуждения системы усилителей был разработан специальный 24-канальный программируемый цифровой генератор (формирователь сигнала), который обеспечивает электронное сканирование диаграммой в вертикальной плоскости. Такое сканирование необходимо для согласования возбуждаемой моды и особенностей морского волновода.

Изменение направления излучения в горизонтальной плоскости обеспечивается механическим блоком вращения, который может управляемым образом поворачивать антенну с точностью 0,1 град.

Мониторинг параметров ХПС. Черноморский подводный волновод формируется верхним теплым слоем воды и холодным промежуточным слоем (ХПС), поэтому мониторинг толщины волновода может дать весьма ценную информацию о запасе холода в Черном море. Прямые измерения вертикального распределения температуры и солености на трассе протяженностью в сотни километров параметров ХПС являются трудными и дорогостоящими. Постоянный мониторинг динамики ХПС на протяженной трассе может быть осуществлен акустическими методами. Проблема определения параметров ХПС 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. На рис. 2 и 3 можно видеть, что собственные функции волновода меняются в соответствии с особенностями профиля скорости распространения звука в волноводе. Поэтому исследование собственных функций волновода в широкой полосе частот с помощью сигналов параметрической антенны может восстановить профиль скорости звука и обеспечить мониторинг холодного промежуточного слоя в Черном море.

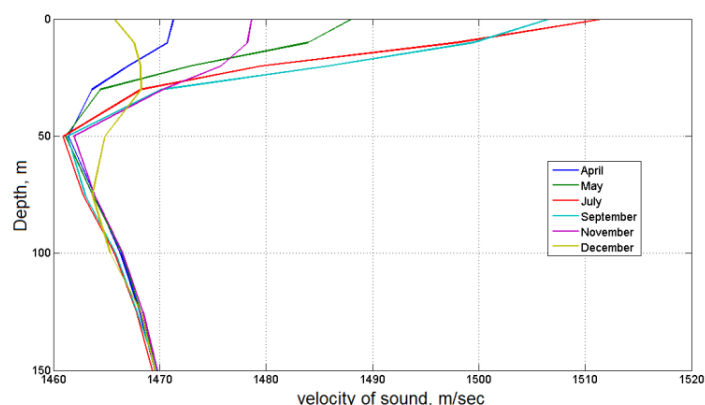


Рис. 2. Профили скорости звука в Черном море для различных месяцев

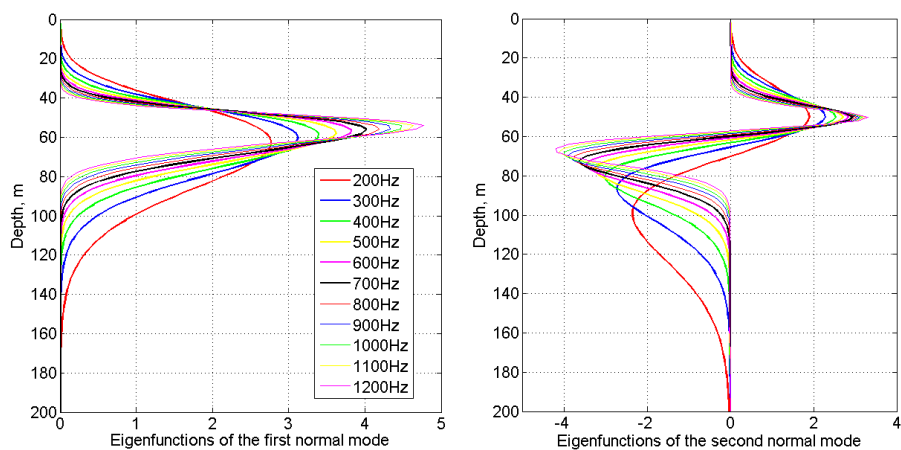


Рис. 3. Собственные функции первой и второй моды в частотном диапазоне от 200 Гц до 1200 Гц для сентябрьского профиля скорости звука

На рис. 4 показана дисперсия групповой скорости для первой моды сигнала в диапазоне частот 200–1200 Гц для сентябрьского профиля скорости распространения звука. Видно, что это типичная дисперсия для подводного волновода, когда групповая скорость первой моды уменьшается с частотой или задержка с приходом сигнала увеличивается с частотой.

Изменения в нижней части профиля скорости звука (ниже оси волнового канала) незначительны в течение года и основные изменения Черноморского волновода связаны с прогревом или охлаждением верхнего слоя (рис. 2). Эти изменения в канале приводят к существенным изменениям в дисперсии групповой скорости соответствующей моды сигнала.

Можно предложить следующую схему акустического мониторинга динамики ХПС на протяженной трассе с использованием ПА. Благодаря острой направленности излучаемого сигнала, ПА обеспечивает эффективное возбуждение первой моды волновода в широкой полосе частот. Исследование распространения широкополосного одномодового сигнала в волноводе позволит получить детальную информацию о модовой дисперсии в волноводе. Такая схема предполагает возбу-

ждение в волноводе широкополосных сигналов. Эти сигналы должны регистрироваться вертикальной цепочкой приемников для возможности пространственной фильтрации мод. Измеряется время распространения отдельных мод низших номеров во всей частотной полосе сигнала и определяется групповая скорость, усредненная по трассе.

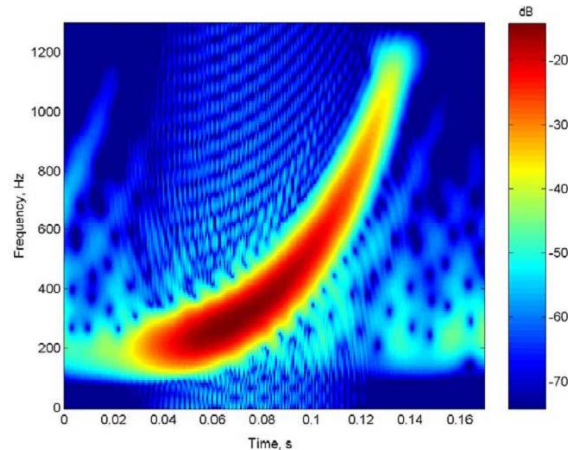


Рис. 4. Частотная дисперсия на трассе 500 км (время задержки прихода как функция частоты) для частотного диапазона от 200 Гц до 1200 Гц для сентябрьского профиля скорости распространения звука

По измеренным значениям групповой скорости разных мод восстанавливается вертикальный профиль скорости распространения звука в волноводе. Так как солёность ХПС является весьма консервативной характеристикой (она мало меняется по трассе), восстановленный профиль скорости звука будет соответствовать профилю температуры вдоль трассы. Надежность восстановления гидрофизических характеристик может быть повышена благодаря прямым измерениям температуры и солёности в некоторых контрольных точках трассы. Такой акустический метод позволит проводить измерения круглый год с высоким разрешением во времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nonlinear Underwater Acoustics, (AIR-Press, New York, 1987).
2. *Igor B. Esipov, Sergey P. Tarasov, Vasily A. Voronin and Oleg E. Popov.* "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.
3. *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. – № 55 (1). – P. 76-80.
4. *Fuks I., Charnotskii M., and Naugolnykh K.* A multi-frequency scintillation method for ocean flow measurement // *J. Acoust.Soc. Am.* – 2001. – № 109 (6). – P. 2730-2738.
5. *Esipov I.B., Zimenkov S.V., Kalachev A.I. and Nazarov V.E.* Sensing of an ocean eddy by directional parametric radiation // *Acoust. Phys.* – 1993. – № 39 (1). – P. 89-90.
6. *Esipov I.B., Kalachev A.I., Sokolov A.D., Sutin A.M. and Sharonov G.A.* Long range propagation experiments with a powerful parametric source // *Acoust. Phys.* – 1994. – № 40 (1). – P. 61-64.
7. *Бреховских Л.М.* Океан и человек. Настоящее и будущее. – М.: Наука, 1987.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Родионов.

Есипов Игорь Борисович – Акустический институт им. Н.Н. Андреева; e-mail: ig-or.esipov@mail.ru; 117036, Москва, ул. Шверника, 4; тел.: 84997236211; д.ф.-м.н.; профессор.

Сизов Иван Иванович – СГИ АНА; e-mail: siziv@yandex.ru; г. Сухум, ул. Красномаякская, 5; тел.: 88402235381; к.ф.-м.н., начальник отдела.

Тарасов Сергей Павлович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: tarasov@fep.ti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Esipov Igor Borisovich – Andreyev Acoustics Institute; e-mail: igor.esipov@mail.ru; 4, Shvernika street, Moscow, 117036, Russia; phone: +74997236211; dr. of phis.-math. sc.; professor.

Sizov Ivan Ivanovich – SHI ASA; e-mail: siziv@yandex.ru; 5, Krasnomayakskaya, street Sukhum; phone: +78402235381; cand. of phis.-math. sc.; head of department.

Tarasov Sergey Pavlovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: tarasov@fep.ti.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; head of department; dr.of eng.sc.; professor.

УДК 534.232

Д.А. Кравчук

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА МОРСКОГО ШЕЛЬФА***

Исследование возможности селективного возбуждения низших мод в мелком море для дистанционного зондирования водной экосистемы. Проведен расчет пространственного распределения амплитуды звукового давления первой моды. Рассчитана трехмерная модель поля давления волны разностной частоты вдоль трассы волновода с учетом коэффициента поглощения за счет вязкости и теплопроводности среды распространения акустических волн и поглощения донным грунтом, для системы дистанционного мониторинга состояния гидросферы мелкого моря. Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности повышения дальности и разрешающей способности обнаружения неоднородностей гидросферы на мелководье.

Мелкое море; экология; возбуждение мод.

D.A. Kravchuk

**RESEARCH OF STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD
OF THE PARAMETRICAL AREA FOR MULTIAGENTNA OF SYSTEM
OF MONITORING OF THE SEA SHELF**

Researchning of vertical distributions for distanse in shallow woter`s ecosystem. On the basis of the received results it is possible to make the conclusion about an opportunity of excitation in an acoustic wave guide in conditions of the fine sea of the lowest styles in a wide strip of frequencies at the appropriate inclination of an acoustic axis of the parametrical radiating aerial. Calculated of 3D model of vertical distributions for distance with water`s absorptance and

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг. » соглашение № 14.А18.21.1284).