534.22 (06)
Н–346

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА-50,

посвященная 50- летию научного направления кафедры электрогидроакустической и медицинской техники

Сборник трудов

17 декабря 2015 года

534.22(06)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ,
ЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
ЗАО НПП «НЕЛАКС»

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА-50,

посвященная 50-летию научного направления кафедры электрогидроакустической и медицинской техники

Сборник трудов

Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2015

УДК 534.22(06)

Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50». Сборник трудов. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2015. – 252

ISBN 978-5-9275-1862-3

В сборнике трудов научно-практической конференции «Нелинейная акустика – 50», проходившей в Южном федеральном университете в г. Таганроге 17 декабря 2015 года собраны работы молодых ученых, аспирантов и студентов. Тематика работ соответствует основному направлению работы конференции.

Оргкомитет научно-практической конференции:
ПШИХОПОВ В.Х. - проректор-директор ИТА ЮФУ.
СТАРЧЕНКО И.Б. - и.о. директора ИНЭП ИТА ЮФУ, директор ОКБ «РИТМ» ЮФУ.
ТАРАСОВ С. П. - (председатель оргкомитета) зав. каф. ЭГА и МТ ИНЭП, д.т.н., профессор.
ПАНИЧ А.Е. - директор ИВТ и П ЮФУ, д.т.н., профессор.
ЧЕРНОВ Н.Н. - (ученый секретарь) д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ.
СКНАРЯ А.В. - главный специалист АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», к.т.н., г. Жуковский.
КУЗНЕЦОВ В.П. - научный сотрудник института Океанологии АН, д.т.н., г. Москва.
ЕСИПОВ И.Б. - д. ф.-м. н., профессор, Акустический институт им. Н.Н. Андреева, г. Москва.
ТИМОШЕНКО В.И. - д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ ИНЭП, президент Южного регионального отделения РАО.
ВОРОНИН В.А. - д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ ИНЭП.
ЗАГРАЙ Н.П. - д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ ИНЭП.
ВИШНЕВЕЦКИЙ В.Ю. - к.т.н., доцент кафедры ЭГА И МТ ИНЭП.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Вареникова А.Ю., Лагута М.В./ Научный редактор Чернов Н.Н.

ISBN 978-5-9275-1862-3 © Южный федеральный университет, 2015

Содержание

В.И. Тимошенко НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА. ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ КАФЕДРЫ.....9

Н.Н. Чернов МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ В ЭКОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ.....14

С.П. Тарасов ПУТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ.....22

Е. Ю.Бондарева, Д. А. Чоп, Д. О. Безматерных, А. В. Данников, К. С. Онищенко ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГИДРОЛОКАТОРА ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДНА НА ШЕЛЬФЕ И ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....37

П.П. Пивнев, В. А. Воронин, Ж. Ю.Бондарева ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН В СРЕДАХ С РАСТВОРЕННЫМИ ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ.....45

А. Ю. Вареникова, Н.Н. Чернов ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ СТРУКТУР БИООБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН СО СРЕДОЙ...55

А.Ю. Вареникова, Н.Н. Чернов ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ СТРУКТУР БИООБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ 2-Й ГАРМОНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН.....60

В.Ю. Волощенко НЕЛИНЕЙНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ГИДРОСАМОЛЕТОВ.....66

П. Ю. Волощенко, В. Ю. Волощенко РАДИО- И ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ВЗЛЕТА И ПРИВОДНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ГИДРОСАМОЛЕТОВ.....73

Е. В. Волощенко, А. П. Волощенко, В. Ю. Волощенко ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛНОГРАФ.....80

А.В. Воронин, В.А. Воронин, К.К. Дегтеренко НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ 88

В.И.Тимошенко, Н.Н.Чернов, М.А. Лупандина СПОСОБ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ОСАЖДАЕМЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ НАНОАЭРОЗОЛЕЙ В МОЩНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ 94

Д.А. Давыдов, Э.В. Гончар, В.Ю. Нерук, В.И. Тимошенко АЭРОТЕМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ЗВУКА В ТРУБЕ РИЙКЕ 101

А.В. Данников, Н.Н. Чернов, В.В. Гривцов СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОРПУСА КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ 105

А.С. Жардецкая, Н.Н. Чернов ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ КРОВОТОКА 110

А. Н. Иванов, В. И. Тимошенко ВОПРОСЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ БЕСШОВНЫХ ТРУБ 115

И.А. Кириченко, В.Ю. Котов, П.В. Лонкин, Д.С. Слуцкий ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА НАПРАВЛЕННОСТЬ СЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН 121

Кириченко И.А., Старченко И.Б., Слуцкий Д.С., Сахаров В.Л. ОСВЕЩЕНИЕ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН 131

В.С. Корнилов, А.П. Морозов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБАСТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ 139

Н.А. Крымская, А.П. Морозов СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ 145

И.А. Кириченко, И.И. Кириченко, Д.М. Кумова МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА 152

И.А. Кириченко, И.И. Кириченко, Д.М. Кумова РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СУБЪЕКТИВНЫХ И ОБЪЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СЛУХА.....157

М.В. Лагута, Н.Н. Чернов К ВОПРОСУ О БЕЗОПАСНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ИНТРОСКОПИИ..162

М.В. Лагута, Н.Н. Чернов ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНТРОСКОПИИ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗДЕСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА.....166

Д.А. Чоп, М.Е. Мищукова, В.А. Обыденная, Ж.Д. Бондарева ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ 170

В.Ю. Нерук, Д.А. Давыдов, Э.В. Гончар ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ, ИНТЕНСИВНОСТИ И ИНЕРЦИОННОСТИ ЗВУКА В ТРУБЕ РИЙКЕ……..178

С.П. Тарасов, П.П. Пивнев, В.А. Воронин, М.Е. Мищукова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХХЫХ АППАРАТОВ.....182

К.С. Онищенко, А.В. Данников, П.П. Пивнев, Д.А. Кравчук ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭКСКУРСОВОД ДЛЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МУЗЕЕВ 190

П.П. Пивнев, Г.В. Солдатов, А.А. Лукьянченко, Д.А. Чоп, Д.О. Безматерных, В.А. Обыденная ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДВОДНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ.....198

С.П. Тарасов, П.П. Пивнев, В.А. Воронин НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГИДРОЛОКАТОР-ПРОФИЛОГРАФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ДНА.....206

П.П. Пивнев ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ 212

С.П. Тарасов, В.А. Воронин, П.П. Пивнев, В.В. Котляров ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ 222

П.П. Пивнев ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИЛЬНОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЯХ 230

П.В. Рахно, В.П. Рыжов ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКЕ .. 237

И.А. Кириченко, Т.В. Титова МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА СФИГМОГРАММ 242

А.К. Хамидулина, В.А.Боженюк МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТЕЗА РУКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ СХЕМЫ ВЫВОДА 248

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В.И. Тимошенко

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА. ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ КАФЕДРЫ

Дается ретроспективный анализ основных достижений кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета за 50 лет в области нелинейной акустики. Приводятся наиболее значимые и взаимозависимые научные, технические и организационные показатели.

Ключевые слова: *Нелинейная акустика, взаимодействие волн и сигналов, гидродинамическое взаимодействие частиц, параметрическая антенна, акустическая коагуляция, осаждение аэрозолей.*

Provides a retrospective analysis of the main achievements of the Department electrohydroacoustical and medical equipment of the Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, southern Federal University for 50 years in the field of nonlinear acoustics. Are the most significant and interdependent scientific, technical and organizational indicators.

Key words: *Nonlinear acoustics, the interaction of waves and signals, hydrodynamic interaction of particles, parametric antenna, acoustic coagulation, deposition of aerosols.*

В год 100-летия Южного федерального университета кафедра электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП) отмечает 50-летие научного направления «Нелинейная акустика» и 30-летие получения Государственной премии СССР в области науки по разделу «Физика» за цикл работ «Создание основ нелинейной акустики и ее приложений». Автор в ноябре этого года выступал с открытой

публичной лекцией по этой теме. В этом докладе делается попытка в сжатой форме отразить наиболее значимые и взаимозависимые научные, технические и организационные результаты. Все они достаточно полно отражены в десятках монографий сотрудников кафедры и в обобщающих книгах [1-3].

Наибольшее число исследований кафедры за полвека посвящено двум ветвям: нелинейному взаимодействию волн и сигналов (направление «Нелинейная гидроакустика») и гидродинамическому взаимодействию частиц тонкодисперсных субмикронных и наноразмерных аэрозолей в мощном звуковом поле (направление «Динамика и кинетика акустической коагуляции и осаждение аэрозолей»). Этому второму направлению посвящен отдельный пленарный доклад на конференции.

Считаю, что главным результатом научного направления «Нелинейная акустика» является последовательное обеспечение в университете учебного процесса и инновационных технологий в приборостроении высококвалифицированными кадрами профессоров и доцентов. На кафедре ЭГА и МТ за 50 лет по специальности «01.04.06 – Акустика» подготовлены и защищены 11 докторских и более 70 кандидатских диссертаций. Для промышленности страны подготовлено более 6,5 тысяч инженеров, бакалавров и магистров по гидроакустике, ультразвуковой технике, биотехническим системам и технологиям. По заказам ведомств и по постановлениям директивных органов по направлению «Нелинейная гидроакустика» выполнены крупные научно-исследовательские работы и НИОКР. Среди них и первая в отечественной и мировой практике серийная рыбопоисковая станция «Пескарь» с параметрическим излучающим трактом. Решена актуальная проблема широкополосного направленного излучения в гидроакустике. Число созданных различных параметрических гидролокаторов, профилографов и др. исчисляется десятками. С частью этих приборов сотрудники кафедры побывали в научных и поисковых экспедициях (их число порядка 50) во всех океанах и многих морях. Среди них две кругосветные экспедиции. Академик

Л.М. Бреховских в двух своих книгах назвал «…параметрические приборы из Таганрога идеальным средством для исследования океана». Впервые в условиях Индийского океана были получены частотные эхограммы звукорассеивающих слоев (дневных и ночных)- аналог известных в электроакустике сонограмм. В океанских условиях были установлены мировые рекорды параметрической приемной антенной с длиной базы почти километр (960 м), а также излучающей и параметрической антенной на дистанции 1000 км (публикация в Acoustic Today, 2010, April). Аппаратурно реализовано «частотное окрашивание» среды с помощью широкополосной параметрической антенны. Проведена серия экспедиций по локации придонных слоев и заиленных объектов в интересах нефтегазового комплекса и подводной археологии. Очень перспективны выполненные исследования и разработки для создания «акустических трасс» в океане.

Следует отметить создание на кафедре уникальной лабораторно-измерительной базы для работ по нелинейной акустике, включающей в себя построенный своими руками измерительный гидроакустический бассейн и стенды. Сыграли свою роль и натурные измерительные базы «Сёмга» и «Миус» [1,2]. Все это позволяло кафедре занимать лидирующие позиции по объему хоздоговорных работ.

В особом ряду стоят работы по поиску кладов и артефактов с помощью параметрических приборов. Эти работы наделами много шума в прессе в прежние времена (поиск «клада Наполеона», корабля Виллема Баренца, царской яхты «Колхида» и др.). На сайте ЮФУ дана информация об очередной поисковой экспедиции на Тамани летом 2015 года. Во всех названных работах принимали участие студенты и аспиранты кафедры. Сувениры, привезенные из многочисленных экспедиций, постепенно оформлялись в музейную экспозицию, которая дополнилась творениями разных художников. На этой базе в 1996 г. на кафедре приказом по ТРТУ была организована художественная галерея «Piter» [1,2]. Выставки картин,

артефактов и, особенно, проведение музыкальных концертов (более 200) способствуют формированию благоприятной творческой атмосферы [1, 2, 4].

Вторая ветвь кафедральных исследований по тематике нелинейной акустики ориентирована на использование акустической коагуляции и осаждения тонкодисперсных промышленных дымов для решения проблем экологии, сохранения здоровья, получения ценных продуктов (технического углерода – сажи, оксидов железа и цинка – сурика и белил, фталевого ангидрида и др., всего 16 различных промышленных дымов) и создания новых акустических технологий осаждения субмикронных частиц.

В последние годы наши исследования осаждения через акустический пограничный слой расширены на область наноразмерных аэрозолей. Эксперименты проведены для четырех типов сигаретного дыма. Впервые получены с помощью атомно-силового микроскопа снимки наноразмерных аэрозолей и их агрегатов. Измерено изменение дисперсного распределения при акустическом осаждении. По научному направлению защищено 2 докторских и около десяти кандидатских диссертаций.

За 50 лет сформировалась научная школа со своим стилем работы и ориентаций на внедрение результатов. Сделано много, еще больше предстоит сделать. Ремейк известной фразы, звучащий по-новому, – «нелинейная акустика бесконечна, как атом» – хорошо отражает состояние дел. Полувековая история наших работ показала правильность этого ремейка. Предшествующие поколения исследователей кафедры подготовили для молодежи обширное поле возможностей для прорывных дел.

Библиографический список

1. Энциклопедия ТРТУ. Том 1 и 2. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. Издания 2002 и 2004 гг.

2. Тимошенко В.И. Судьбу сотворившие. История кафедры в очерках, фотографиях и воспоминаниях сотрудников/ В.И. Тимошенко. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2001. – 562 с.

3. Грабарь А.Г., Захаров И.С., Тимошенко В.И., Шошков Е.Н. История гидроакустики/ А.Г. Грабарь и др. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. – 560 с.

4. История Таганрогского государственного радиотехнического университета. К 100-летию ЮФУ. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – 40 с.

Тимошенко Владимир Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Timoshenko Vladimir I. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 534.29: 551.594.25

Н.Н. Чернов

МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ В ЭКОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Рассмотрены нелинейные процессы в мощных акустических полях, применяемых при акустическом осаждении наноразмерных и микронных промышленных аэрозолей и в медицинской хирургической практике. Показано, что в акустическом поле происходит взаимное влияние гидродинамических полей обтекания тонкодисперсных частиц промышленных аэрозолей, приводящее к их интенсивной коагуляции, что позволяет повысить эффективность их осаждения промышленными схемами улавливания частиц. Рассмотрены механизмы разрушения тканей в высокоинтенсивных акустических полях.

Ключевые слова: *Акустическая коагуляция, осаждение дымов, пограничные слои, диффузия, фокусированный ультразвук, литотрипсия.*

Nonlinear processes in strong acoustic fields applied to acoustic deposition of nano and micron-industrial aerosols in medical and surgical practice. It is shown that the acoustic field there is a mutual influence of hydrodynamic fields of the flow around the fine particles of industrial aerosols, which leads to their intense coagulation that can improve the efficiency of their industrial deposition schemes of capture of the particles. The mechanisms of tissue destruction in high-intensity acoustic fields.

Key words: *Acoustic coagulation, deposition fumes, boundary layers, diffusion, focused ultrasound, lithotripsy.*

За полвека на кафедре электроакустической и медицинской техники (ТРТИ – ТРТУ – ЮФУ) выполнено много инновационных научных исследований и работ по промышленному внедрению акустических технологий на основе нелинейных процессов в мощных акустических полях [1]. Среди этих работ заметное место занимают фундаментальные исследования и практические результаты по

акустической коагуляции и осаждению тонкодисперсных промышленных аэрозолей (окиси-белил цинка, оксидов железа конвертеров, дымов ТЭЦ, технического углерода-сажи, фталевого ангидрита и др., всего около полутора десятков видов) [1,2].

В связи с обозначившимся интересом к нанотехнологиям, были провели вначале экспериментальные (2006–2011 гг.), а затем теоретические (2010–2012 гг.) исследования осаждения наноразмерных аэрозолей в акустических полях [3]. Эта тематика ориентирована на выяснение параметров технологических установок для нанесения наночастиц при создании новых материалов, при реализации защитных покрытий, протекции обрастания в загрязнённой среде лопаток турбин и поверхностей скоростных аппаратов и др.

Особенности нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн в биотканях являются важным фактором применения ультразвука в медицинских целях. Применяя технику фокусирования, удается концентрировать ультразвуковую энергию в локальной области и на любой глубине озвучиваемого объема в направлении распространения ультразвуковых волн. Этот метод лег в основу ультразвуковой хирургии и литотрипсии, позволяющих проводить лечение целого ряда болезней: мочекаменная болезнь; болезнь Пейрони; камни желчного пузыря и желчных протоков; камни протока поджелудочной железы; камни слюнных желез; болевого синдрома, связанного с отложением солей и воспалением фасций и связок в области стопы и различных суставов; ложных суставов и длительно срастающихся переломов трубчатых костей; заболеваний опорно-двигательного аппарата и других. К настоящему времени развиваются разнообразные методы воздействия высокоинтенсивным фокусированным ультразвуком на доброкачественные опухоли, при лечении доброкачественной гиперплазии простаты, аденомы простаты, рака простаты. Однако, по-прежнему, для успешного и эффективного применения в клинической практике развиваемых новых методик и аппаратов, требуется исследование процесса

нелинейного распространения ультразвука в биологической ткани, которое приведет к пониманию всего спектра возможного влияния ультразвука на организм человека, как благоприятного, так и неблагоприятного.

Решение прикладной проблемы создания экологически и экономически рациональной системы подготовки в акустическом поле к очистке от взвешенных частиц дымовых газов в традиционных осадительных устройствах было получено на основе теоретических исследований индивидуальных свойств аэродисперсной среды, разработки новых конструктивных схем акустических коагуляционных осадительных устройств, обеспечивающих интенсивное улавливание микронных и субмикронных взвешенных частиц. Для этих целей была разработана конструкторская документация на три базовых типа излучателей: малой (до 1 кВт), средней (до 6 кВт) и большой (более 10 кВт) мощности, рабочим телом которых может быть сжатый воздух до 0,3 ÷ 0,6 МПа или низкотемпературный пар давлением до 1 МПа, работающих в диапазоне частот от 100 Гц до 3000 Гц. С помощью этих излучателей можно создавать технологические и экологические установки производительностью от тысячи $м^3$ до сотен тысяч $м^3$ обрабатываемых газов в час при расходе рабочего тела от 10 до 500 $нм^3$/час и электроэнергии от 0,1 до 3 кВт/час.

Фотография сирены для промышленных коагуляционных установок с объёмом обрабатываемого пылегазового потока до 1000 м3/час представлена на рис. 1.

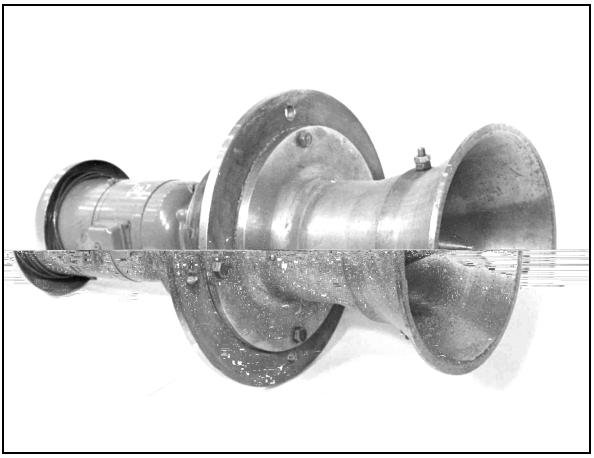


Рисунок 1 – Низкочастотная электродинамическая сирена СДН 0.5

Основные технические характеристики сирены СДН 0.5:

– диапазон рабочих частот, Гц	300 – 3000;
– акустическая мощность, кВт	0,5;
– давление рабочего тела (воздуха), МПа	0,3 – 0,4;
– расход сжатого воздуха через сирену, $м^3$/час	7;
– мощность электропривода сирены, кВт	0,25;
– габаритные размеры (без двигателя), мм	$\varnothing$ 280 $\times$ 300;
– масса, кг	20.

Диффузор сирены рассчитан на согласование с закрытым пространством (газоходом) диаметром (или квадратом) 200 – 250 мм. Регулированием давления воздуха от 0,6 до 1,4 атм. достигалось изменением звукового давления в коагуляционном объеме от 350 до 1300 Па. При максимальных параметрах акустическая мощность была порядка 100 Вт.

Промышленные предприятия различного профиля, в большинстве случаев, для очистки производственных дымов используют осадительные аппараты производительностью десятки тысяч $м^3$/час. Чтобы озвучить такие объёмы, требуются источники высокоинтенсивных акустических колебаний мощностью в несколько

кВт. Для этих целей специально была разработаны низкочастотные электродинамические сирены средней С-200 и большой С-450 мощности.

Основные технические характеристики сирены С-200 приведены ниже:

– диапазон рабочих частот, Гц	400 – 600;
– акустическая мощность, кВт	3,5 – 5;
– давление рабочего тела (воздуха или пара), МПа	0,4 – 0,8;
– расход воздуха (пара) через сирену, $м^3$/час	1000;
– мощность электропривода сирены, кВт	1,0;
– габаритные размеры, мм	
– высота без электропривода	1300;
– ширина	950;
– масса, кг	565.

Диффузор сирены рассчитан на согласование с закрытым пространством (газоходом) диаметром (или квадратом) 1000 – 1200 мм. Разработанная сирена может работать как на сжатом воздухе, так и на низкопотенциальном паре. Использование пара позволяет применять сирену в тех производственных процессах, когда разбавление производственных газов воздухом нежелательно.

Максимальный уровень звукового давления составил около 150 дБ (давление пара в камере сирены было 7 атм., а расход пара 1000 кг/час). Исследования спектрального состава излучения сирены показали, что сирена, работая на своей основной частоте 560 Гц, имела, по сравнению с уровнем основной гармоники, уровень второй гармоники около 5 %, третьей гармоники – 3 %, четвертой гармоники – 2 %.

Мощная низкочастотная аксиальная сирена С-450 с экспоненциальным согласующим диффузором разработана для предприятий теплоэнергетики, где необходимо озвучивать объёмы газов, превышающие 500 тыс. $м^3$/час.

Чертёж общего вида мощной аксиальной сирены С-450, поясняющий её конструкцию, показан на рис. 2.

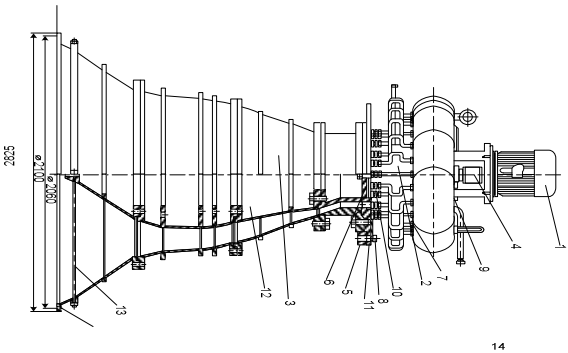


Рисунок 2 – Конструкция мощной аксиальной электродинамической сирены С-450

Основные технические и эксплуатационные характеристики сирены приведены ниже:

– диапазон рабочих частот, Гц 100 – 1000;
– акустическая мощность, кВт 8 – 12;
– давление рабочего тела (пара), МПа 0,6 – 1,0;
– расход пара через сирену, кг/час 800;
– мощность электропривода сирены, кВт 2,0;
– габаритные размеры, мм
– высота без электропривода 2830;
– ширина 1200;
– масса, кг 1280.

Для развития физических подходов, позволяющих исследовать нелинейные процессы взаимодействия фокусированного ультразвукового пучка со слоистыми структурами биологических тканей и учета эффектов, возникающих при прохождении ультразвукового луча через слоистую структуру биоткани, были проведены модельные и экспериментальные исследования, по результатам которых сделаны следующие заключения [4]:

– создана теоретическая модель распространения акустического поля в слое биоткани, позволяющая решать задачу прохождения ультразвука через слоистую структуру биоткани с учетом коэффициентов прохождения для биотканей;

– на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований выявлено влияние слоистой структуры биоткани на формирование формы фокальной области при прохождении фокусированного ультразвукового пучка;

– разработаны методика и алгоритм повышения точности локального воздействия фокусированным ультразвуком на биоткани за счет учета нелинейных эффектов, возникающих при прохождении ультразвукового пучка через слоистую структуру биоткани.

По результатам исследований были разработана структурная схема и алгоритм блока коррекции и управления аппаратами для ультразвуковой хирургии, позволяющие производить коррекцию интенсивности, формы фокальной области и места ее локализации за счет учета смещения траектории ультразвукового луча в зависимости от толщины биоткани, угла падения на биоткань и типов слоев биоткани. Это позволило повысить безопасность и эффективность хирургического воздействия фокусированного ультразвука на патологические объекты внутри организма, что способствует распространению методов неинвазивной хирургии.

Библиографический список

1. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле./Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2003. – 304 с.

2. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Осаждение и осадконакопление промышленных дымов. /Ростов-на-Дону: Ростиздат. – 224 с.

3. Лупандина М.А., Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Влияние акустического пограничного слоя на осаждение наноразмерных аэрозолей. // Известия ЮФУ. Технические науки. – №9, сентябрь. Ростов н/Д , 2012 г. 215 – 219 с.

4. Леонова А.В., Чернов Н.Н. Влияние слоистой структуры биоткани на акустическое поле мощного источника ультразвука //

Сб. докладов V ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 161 – 164 с

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП). E-mail: nnchernov@sfedu.ru. 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко 2. Тел.: 88634371795, кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н., профессор.

Chernov Nicolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 534.222

С.П. Тарасов

ПУТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований нелинейных явлений в акустике. Рассматриваются процессы нелинейного взаимодействия акустических волн. Показано, что использование этих явлений позволяет создавать гидроакустические приборы и комплексы для поиска подводных и заиленных объектов, подводного наблюдения, разведки минеральных и биологических ресурсов, мониторинга океанской среды. Приводятся характеристики параметрических приборов и рассматриваются результаты их применений для решения различных задач гидроакустики. Обсуждаются пути совершенствования и перспективы применения гидроакустических средств, использующих методы нелинейной акустики.

Ключевые слова: *нелинейные явления, нелинейное взаимодействие акустических волн, параметрические антенны, характеристика направленности, реверберация, объемное рассеяние, эхограммы придонных слоев, дисперсия скорости распространения сигнала в мелком море.*

The results of theoretical and experimental researches of the nonlinear phenomena in acoustics are discussed. Processes of nonlinear interaction of acoustic waves are considered. It is shown, that use of these phenomena allows to create hydroacoustic devices and complexes for search underwater and buried objects, underwater supervision, investigation of mineral and biological resources, monitoring of the ocean environment. Characteristics of parametrical devices are discussed and results of their applications for the decision of various problems of hydroacoustics are considered. Ways of perfection and principles of construction of the hydroacoustic means using methods of nonlinear acoustics are discussed.

Key words: *the nonlinear phenomena, nonlinear interaction of acoustic waves, parametrical arrays, beam pattern, reverberation, volume scattering, sub-bottom layers echograms, signal speed dispersion in shallow water.*

Перспективным направлением в акустике и, в частности гидроакустике, для решения многих прикладных задач представляется разработка аппаратуры, действующей на принципах нелинейного взаимодействия акустических волн. Использование приборов с параметрическими излучающими антеннами, обладающими высокой направленностью при малых размерах, низким уровнем бокового излучения, широким диапазоном излучаемых частот с постоянной направленностью, позволяет более эффективно решать большое число задач подводного поиска и звукоподводной связи.

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.

В работе рассматриваются возможности решения отдельных проблем подводного наблюдения, связи и проведения исследований с использованием параметрической гидроакустической аппаратуры.

Для описания процессов нелинейного взаимодействия акустических волн используются различные математические модели, основанные на методах Вестервельта, Моффетта-Меллена, волновых фронтов и, в том числе модели на основе решения уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова [1]. Математическое выражение, полученное на основе этой модели является, на наш взгляд, наиболее перспективным и позволяет рассчитать амплитуду звукового давления

на комбинационных частотах в любой точке пространства при разных параметрах антенны и сигнала. Решение уравнения для амплитуды акустического давления сигнала разностной частоты записывается в виде [1-3]:

$$P_{-} = \frac{P_{01}P_{02}\varepsilon\Omega^2 a^2}{8c_0^4\rho_0 \exp(z/L_3)} i\int_0^{z_3} \frac{\exp\left[-y - \frac{r_w^2(1+iBy)}{d+(y-z_3)+yz_3B}\right]}{d+i(y-z_3)+yz_3B} dy,$$

где $P_{01}P_{02}$ – амплитуды давления волн накачки у поверхности антенны; ε – нелинейный параметр; $\Omega = 2\pi F_{-}$ – разностная частота; a – апертура излучателя накачки; $L_3 = 1/\alpha_{-}$; α_{-} – коэффициент затухания волны разностной частоты; $z_3 = z/l_3$; z – координата вдоль распространения волны; $l_3 = 1/\alpha_{1,2}$; $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты затухания волн накачки; $d=L_D/l_3$, $B=L_D\, l_3 /l_{D1}\, l_{D2}$, $r_w^2 = 2r^2 L_D / a^2 l_3$; $L_D = a^2\, \Omega/4c_0$; $l_{D1,}l_{D2} = a^2\, \omega_{1,2}/2c_0$; r – поперечная координата.

К основным проблемам обнаружения подводных объектов на мелководье и вблизи поверхности относится наличие интенсивных реверберационных и шумовых помех. Выражение для расчета энергетических характеристик параметрического гидролокатора с учетом шумовой помехи, объемной и поверхностной реверберации получено в виде:

$$W_a = \frac{2\delta P_{по} 10^3 l_{Dl} l_{D2} \cdot \frac{1}{F_{-}^2 \alpha L_D \gamma_{изл} \cdot \rho c \sqrt{\gamma_{пр}\tau}}}{\frac{I(B,y)}{10^{0,05\beta x} e^{x/L_з}} \left[\left(\frac{R_э}{2x}\right)^2 - \left(\delta\sqrt{\frac{\alpha_{ор}\eta_{ор}c\tau}{2\gamma_{изл}}}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2}\sqrt{\frac{\alpha_{пр}h\eta_{пр}c\tau}{x\gamma_{изл}}}\right)^2\right]^{1/2}},$$

где δ – отношение сигнал-помеха; $P_{по}$ – уровень шумовой помехи; $I_{D1,D2} = a^2\omega_{1,2}/2c_0$; $F_{-} = \Omega/2\pi$; $\alpha = (\gamma+1) / 4\rho_0 c_0^3$; $L_D = a^2\Omega/4c_0$; $\gamma_{изл}$ –

коэффициент концентрации в режиме излучения; $\gamma_{пр}$ – коэффициент концентрации в режиме приема; τ – длительность импульса; I(B,y) – интеграл, описывающий процесс нелинейной генерации; Rэ – радиус эквивалентной сферы; $\alpha_{ор}, \alpha_{пр}$ – коэффициенты объемной и поверхностной реверберации; $\eta_{ор}, \eta_{пр}$ – коэффициенты взаимной направленности; β – коэффициент затухания.

В соответствии с этим выражением можно рассчитать акустическую мощность по каждому каналу параметрической антенны, необходимую для того, чтобы в условиях шумовой и реверберационной помех обеспечить заданную дальность обнаружения.

Характеристики обнаружения в присутствии помех изменяются в зависимости от расстояния, на котором находится цель. На рис. 1 представлены зависимости отношения сигнал-помеха δ от расстояния обнаружения подводного объекта с $R_{экв}$ = 0,1 м при акустической мощности 70 Вт, излучаемой по каждой из частот накачки. Влияние отдельно объемной реверберации с $\alpha_{ор}$ = 10^{-6}1/м, поверхностной реверберации с $\alpha_{пр}$ h = 10^{-3} и шума с уровнем $P_{по}$ = 0,01 Па представлено кривыми 1, 2 и 3 соответственно. Отношение сигнал/помеха падает при совместном воздействии шума и объемной реверберации (кривая 4), шума и поверхностной реверберации (кривая 5). При воздействии всех видов помех (кривая 6) отношение сигнал/помеха принимает наименьшее значение на всех расстояниях и характеризует возможность обнаружения цели с заданной вероятностью.

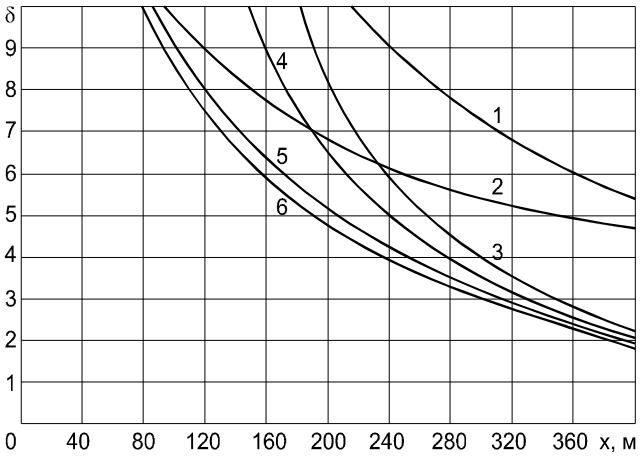


Рисунок 1 – Зависимость отношения сигнал-помеха от расстояния обнаружения

Зависимости рассчитаны с учетом влияния доплеровского смещения частоты за счет движения, что приводит к необходимости значительного расширения полосы пропускания приемного тракта и, соответственно, снижает помехоустойчивость и дальность действия. Сужение полосы и увеличение длительности зондирующих сигналов существенно увеличит дальность обнаружения.

Значительный интерес в последнее время прикован к вопросам, связанным с возможностью дистанционного измерения вертикального распределения скорости звука в океане. В этом случае получение информации о свойствах среды обусловлено характером рассеяния акустических волн.

Методика расчета энергетических характеристик параметрических гидролокационных систем дистанционного зондирования неоднородностей в океане разработана на основе решения уравнения гидролокации [4]. Она может быть использована при решении задач построения адаптивных гидролокационных систем диагностики водной среды в океане и дистанционных измерителей вертикального распределения скорости звука.

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

$$\alpha_{ор} = \frac{2\delta^2 \cdot P_{по}^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{0,05\beta c\tau} \cdot \gamma_{изл} \cdot \rho_0 \cdot c^5}{F^4 \cdot \pi^2 \cdot \tau_2 \cdot \gamma_{пр} \cdot P_{01}^2 \cdot P_{02}^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot L_d^2 \cdot e^{-2x/L_z} \cdot I^2(B,y) \cdot \eta_{ор}}$$

где δ – отношение сигнал-помеха; $P_{по}$ – уровень шумовой помехи; τ – длительность излучаемого сигнала; ε – параметр нелинейности; $L_з = 1/\beta$; F – разностная частота; $\Omega = 2\pi F$; $I_1(B,y) = \int_0^y \frac{\exp(-z)dz}{d + yzB + i(z-y)}$,

$y = \frac{x}{l_з}$; $d = \frac{L_D}{l_з}$; $B = \frac{L_D l_з}{l_{D1} l_{D2}}$; $L_D = \frac{a^2\Omega}{4c_0}$; $l_{D1}, l_{D2} = a^2\omega_{1,2}/2c_0$ – 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.

По полученным экспериментально частотным зависимостям 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°, в режиме приема изменяется в соответствии с частотой от 8° до 30°, 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 пузырных рыб, присутствующих в слое. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее [5].

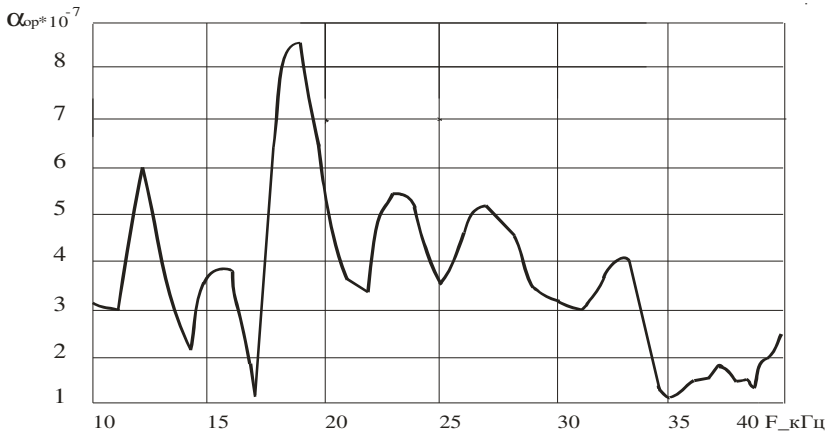


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициента объемного рассеяния в океане с горизонта 35 м

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

Перспективы применения 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 [6].

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода [5]. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно большие 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 [7].

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 –90° – +90° в горизонтальной плоскости. Глубина места в районе экспериментов составляла 2,5 – 3 м. Средняя частота излучения (частота накачки) составляла 150 кГц. Разностная частота или частота излучения сигнала лежала в диапазоне 5 кГц – 20 кГц. Электрическая мощность усилителя антенны – 1 кВт для каждой из частот накачки. Приемная антенна выполнена в виде вертикальной цепочки из восьми гидрофонов, которые располагались с шагом 0,25 м на металлической штанге.

На рис. 3 приведены 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. 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.

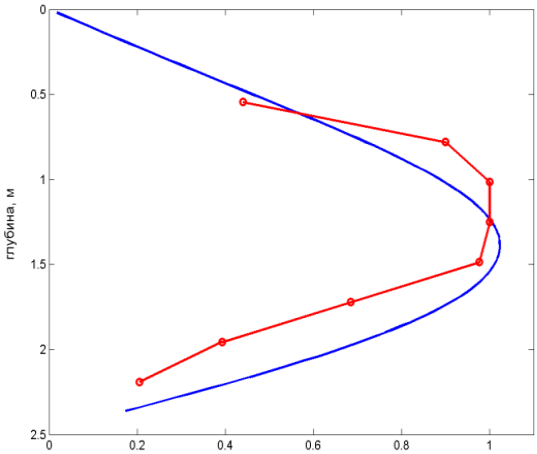


Рисунок 3 – Нормированное распределение уровня сигнала по вертикальному сечению волновода и расчет первой моды

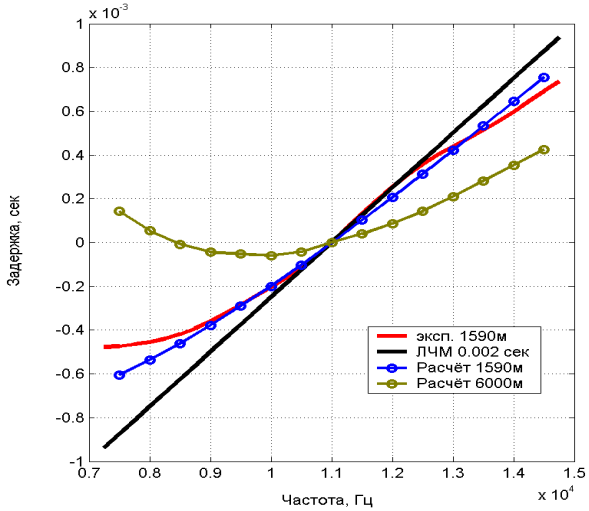


Рисунок 4 – Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала. Результаты эксперимента и расчета

Расчет дисперсии групповой скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала при его распространении в мелководном волноводе. На рис. 4 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.

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. 5.

Рисунок 5 – Гидроакустическая параметрическая антенна для мониторинга океана на протяженных трассах

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 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) и 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 (см. рис.5). 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 (см. рис.5).

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

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

Пример 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°. в вертикальной плоскости и 8° – в горизонтальной плоскости, постоянной во всем частотном диапазоне, приведены на рис. 6. Здесь демонстрируется распространение сигнала высоконаправленной параметрической антенны вдоль трассы длиной 20 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости составляет 5°.

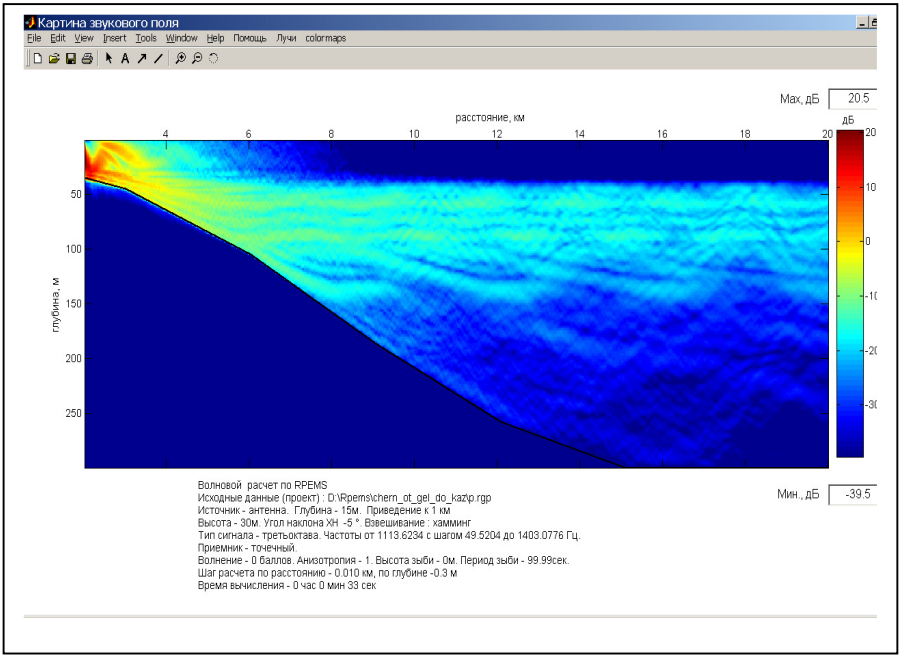


Рисунок 6 – Интенсивность акустического поля параметрической антенны вдоль трассы распространения длиной 20 км. Угол компенсации в вертикальной плоскости 5°.

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.

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, построения систем подводной навигации и управления движением малоразмерных автономных подводных аппаратов, создания высокоэффективных

систем зондирования океана с целью обнаружения объектов и случайных неоднородностей.

Библиографический список

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. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л.: Судостроение, 1966. – 354 с.

5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 264 с.

6. Житковский Ю.Ю., Котляров В.В., Кузнецов В.П., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Исследование объемного рассеяния звука в океане параметрическим гидролокатором // Доклады Академии наук СССР, 1989. Т.305. №4. С. 970–973.

7. Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Об эффективности фокусировки звукового поля в океаническом волноводе в присутствие фоновых внутренних волн // Акуст. журн. 2006. Т.52. №5. С.693–701

Тарасов Сергей Павлович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Tarasov Sergey P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc., professor.

УДК 621.3721.54; 534.222

Е.Ю. Бондарева, Д.А. Чоп,
Д.О. Безматерных, А.В. Данников, К.С. Онищенко
Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ
П.П. Пивнев.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГИДРОЛОКАТОРА ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДНА НА ШЕЛЬФЕ И ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Целью данной работы является исследование частей инженерных сооружений, находящихся под водой, и заиленных объектов. Достижение данной цели возможно благодаря использованию многозадачных гидроакустических систем и комплексов. Одним из наиболее эффективных средств решения данных задач является параметрический гидролокатор. В статье рассмотрена структурная схема данного устройства, а также данные экспериментальных работ по обследованию и контролю подводных частей опор мостов. В заключении приведен анализ экспериментальных данных и возможностей параметрического гидролокатора.

Ключевые слова: *гидроакустические средства, параметрический гидролокатор, донное профилирование.*

The aim of this work is the study of the parts of engineering structures under water and silted objects. This goal can be achieved through the use of multi-tasking sonar systems and complexes. One of the most effective means of solving these problems is the parametric sonar. The article describes the structural scheme of the device, and data of experimental work on survey and inspection of the underwater parts of the bridge piers. In conclusion, the analysis of the experimental data and the capabilities of the parametric sonar.

Key words*: tools, sonar, parametric sonar, bottom profiling.*

Современные морские инженерные, геологоразведочные и экологические работы положили начало новому этапу освоения прибрежных акваторий и подводных месторождений природных ресурсов. Для этих целей используются различные методы диагностики (исследование объектов водолазами, видеосъемка и гидроакустические методы). Преимущество гидроакустических методов исследования заключается в том, что они позволяют исследовать как подводную часть объектов, так и заиленную в осадках и могут использоваться в мутной воде, при течениях и в широком диапазоне температур воды.

Для решения задач такого рода целесообразно использовать гидроакустические системы и комплексы, которые могут включать в себя многолучевые эхолоты, профилографы, параметрические гидролокаторы и пр.

Среди многих гидроакустических средств параметрические узколучевые гидролокаторы выделяются принципиальными достоинствами.

Во-первых, один и тот же участок среды в пределах узкого луча, одинакового на всех частотах, озвучивается с большим пространственным разрешением. Это обеспечивает достоверное измерение параметров. Во-вторых, использование ЛЧМ сигналов с большой базой и соответствующей временной обработкой в приеме компенсирует сравнительно невысокий энергетический потенциал параметрического излучателя.

Кроме того, параметрический гидролокатор за счет узкого безлепесткового луча на низких частотах позволяет обнаружить и получить информацию о состоянии подводных частей опор мостов, трубопроводов, расположении подводных месторождений полезных ископаемых. В случае параметрического излучателя число длин волн, укладывающееся в длине области их взаимодействия, очень велико, и угловая ширина диаграммы в реальных устройствах не превышает нескольких градусов.

Изменение частот f_1 и f_2 электрических сигналов в пределах резонансной кривой дает возможность плавно изменять частоту F в широких пределах. Структурная схема параметрического гидролокатора представлена на рис. 1 [1].

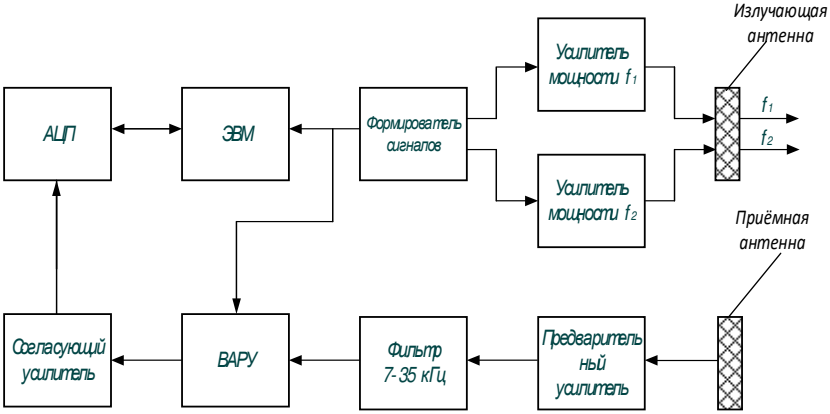


Рисунок 1 – Структурная схема параметрического гидролокатора

Предварительный усилитель, фильтры высоких и низких частот, а также временная автоматическая регулировка усиления объединены в одной микросхеме, позволяющей контролировать такие характеристики приемного тракта, как коэффициент усиления и суммарный коэффициент ослабления ФВЧ и ФНЧ. Формирователь сигналов обеспечивает создание двух сигналов различной частоты. Формирователь сигналов осуществляет регулировку ВАРУ и оказывает одно из управлявших воздействий на ЭВМ. Усилители мощности, следующие за формированием сигналов, обеспечивают необходимую величину мощности, подаваемую на излучающую антенну. Согласующий усилитель доводит величину сигнала до необходимого для его работы значения. Блок АЦП осуществляет оцифровку полученного аналогового сигнала для возможности дальнейшей его обработки на ЭВМ. ЭВМ осуществляет арифметико-логическую обработку полученного в результате сигнала, сравнение

его с образцами и выдачу окончательного заключения по результатам исследования [1, 2].

В данной статье приведены данные экспериментальных работ по обследованию и контролю подводных частей опор мостов. Далее приведены результаты работ по контролю опор мостов на реке Хан, в районе Сеула и на реке Дон, в районе села Верхний Мамон Воронежской области.

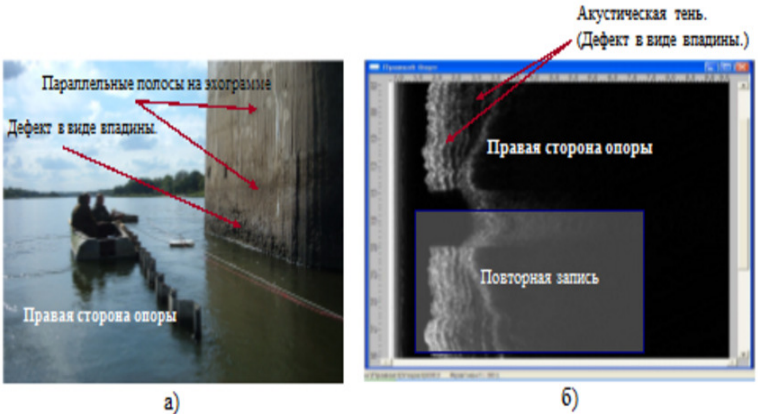


Рисунок 2 – Диагностика правой стороны опоры автомобильного моста через р. Дон гидролокатором бокового обзора
а – место проведения исследований, б – эхограмма подводной части опоры

На рис. 2 приведена фотография правой стороны опоры и эхограмма её подводной части, полученная гидролокатором бокового обзора с рабочей частотой. Приведена повторная запись правой стороны опоры, на которой акустическая тень показывает дефект в виде впадины. Параллельные полосы на эхограмме правой стороны опоры построены на частоте 260 кГц, с длительностью зондирующего импульса 32 мс и полосой зондирующего широкополосного сигнала 32 кГц.

Длинный зондирующий импульс позволяет увеличить энергию зондирующего сигнала, тем самым расширить диапазон

рассматриваемого участка дна водоема, а широкая полоса сигнала определяет высокую разрешающую способность по дистанции при оптимальной его обработке. Разрешающую способность гидролокатора в горизонтальной плоскости определяет ширина характеристики направленности, которая в используемом приборе составляет 1°. Приведенная эхограмма показывает, что опора моста спереди немного подмыта, а сзади течением нанесен грунт. Также на стенке опоры видны дефекты.

Для профилирования дна вблизи инженерных сооружений и под ними требуется низкочастотная волна с высокой интенсивностью. Для этих целей применяют параметрические гидролокаторы, в которых за счет взаимодействия в среде излучаемых высокочастотных волн накачки генерируется низкочастотная волна разностной частоты. Повысить интенсивность волны разностной частоты можно различными способами, в частности при помощи использования ЛЧМ сигналов в волнах накачки.

На рис. 3 приведены эхограммы дна и донных осадков в районе моста с записями фрагмента опоры моста на р. Хан, в районе Сеула.

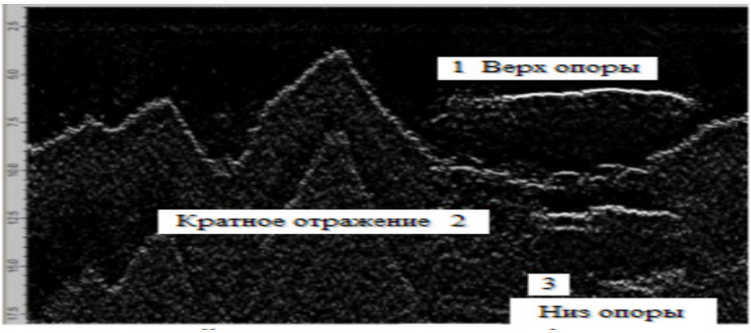


Рисунок 3 – Эхограммы дна, осадков в районе моста с записями фрагментов опоры моста сделанная при помощи параметрического профилографа

На эхограмме видна верхняя поверхность подушки опоры, которая выступает над грунтом 1, кратное отражение от нее 2 и отражение от нижнего края подушки 3, расположенного на глубине 7м под слоем грунта.

При проведении работ использовался профилограф со следующими параметрами: длительность импульса – 8 мс, полоса рабочих частот – 7–15 кГц, вид сигнала – линейно-частотно-модулированный с девиацией 8 кГц. Ширина характеристики направленности параметрической антенны – 3 градуса во всем диапазоне разностных частот. Средняя частота сигнала накачки – 140 кГц.

Из рис. 3 видно, что верх опоры вымыт из грунта. Можно определить положение нижней части фундамента опоры и расположение подушки, на которой находится опора.

Таким образом, применение гидроакустических технологий для контроля инженерных сооружений, таких как параметрические гидролокаторы со сложными сигналами, позволяет оценить расположение и состояние подводной и заиленной частей сооружений. Очевидна необходимость построения приборов контроля, которые могут работать в сложных условиях эксплуатации (мелководье, течение, наличие пузырьков газа и т.д.), а также разработки технологии контроля, которая позволит оценить состояние подводной и заиленных частей инженерных сооружений находящихся под водой.

Библиографический список

1. Воронин В.А., Чернов М.Н. Портативный параметрический гидролокатор для экологического исследования донных отложений Азовского моря, Известия ТРТУ.

2.Солдатов Г.В., Перенижко И.В., Ткач Д.В. Применение параметрических антенн для определения акустических свойств и структуры морского дна на шельфе. Сборник трудов Научной

конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества". Т.2. – М.: ГЕОС, 2012. – 359 с.

3. Есипов И.Б., Тарасов С.П. Сизов И.И. Параметрическая антенна для гидрофизических исследований на протяженных трассах. Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества". Т.2. – М.: ГЕОС, 2012. – 359 с.

Бондарева Елена Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: Bondarevaelena67@gmail.com, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 1-го курса.

Чоп Дмитрий Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант 1-го курса.

Безматерных Дмитрий Олегович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Данников Артем Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: Dav.91@list.ru, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант 2-го курса.

Онищенко Кирилл Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: Grifin-92@inbox.ru, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант 2-го курса.

Bondareva Elena Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: Bondarevaelena67@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 1-th course.

Chop Dmitriy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 4-th course.

Bezmaternyh Dmitriy O. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student of 1-th course.

Dannikov Artem V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal

University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student of 2-nd course.

Onishchenko Kirill. S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student of 2-nd course.

УДК 534.22

П.П. Пивнев, В. А. Воронин,
Ж. Ю.Бондарева

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН В СРЕДАХ С РАСТВОРЕННЫМИ ГАЗОВЫМИ ПУЗЫРЯМИ

Целью данной работы является исследование нелинейного взаимодействия волн в средах с растворенными газовыми пузырями. В статье рассматривается нелинейное взаимодействие акустических волн в приповерхностном слое моря, содержащем большое количество растворённого газа и влияние дисперсии на характеристики взаимодействия волн. Анализ результатов показал, что скорость звука зависит от концентрации пузырьков в водной среде и от частоты распространения акустических волн, т.е. в среде присутствует дисперсия.

Ключевые слова: *нелинейное взаимодействие, акустическая дисперсия, осевое распределение волн.*

The aim of this work is to study the nonlinear interaction of waves in media with dissolved gas bubbles. The article considers the nonlinear

interaction of acoustic waves in the subsurface layer of the sea, containing large amounts of dissolved gas and the effect of dispersion on the characteristics of wave interaction. Analysis of the results showed that the speed of sound depends on the concentration of bubbles in the aqueous medium and on the frequency of propagation of acoustic waves, i.e., have variance.

Key words: *nonlinear interaction, acoustic dispersion, the axial distribution of the waves.*

Нелинейное взаимодействие акустических волн в приповерхностном слое моря, содержащем большое количество растворённого газа, происходит при наличии физической дисперсии скорости распространения волн в этом слое. Дисперсия связана с изменением скорости звука, вызванном изменением сжимаемости воды, содержащей газовые включения [1].

Дисперсия оказывает существенное влияние на характер нелинейных процессов. Дисперсионные эффекты, как и нелинейные, при взаимодействии волн носят накапливающийся характер. Даже при слабой дисперсии характер взаимодействия волн может заметно изменяться. Морская вода обладает очень слабой дисперсией, но наличие пузырьков газа, растворов солей, микроорганизмов может существенно изменять её дисперсионные характеристики. Дисперсионные эффекты возникают также при взаимодействии различных мод в мелком море [2,3].

Рассмотрим влияние дисперсии на характеристики взаимодействия волн на примере анализа уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК) для безграничной среды. При этом будем полагать, что в среде существует дисперсия вне зависимости от того, какой физический эффект её порождает. При наличии дисперсии волновые вектора взаимодействующих волн неколлинеарны и их проекции на координату, вдоль которой распространяются волны, неодинаковы.

Амплитуда волны разностной частоты описывается уравнением [1,2]:

$$\frac{\partial P_-}{\partial z} - \frac{1}{2iK}\Delta_\perp P_- = \frac{i\varepsilon\ \Omega}{2c_0^3\rho_0} A_1 A_2^* \exp(-\alpha z - i\Delta z)\ , \qquad (1)$$

где $\Delta = (k_1 - k_2 - K)\cdot l_3$ – изменение фазового сдвига между взаимодействующими волнами на расстоянии пропорциональном l_3, α – коэффициент затухания для волн накачки, A_1 и A_2^* функции, удовлетворяющие параболическому уравнению $\frac{\partial A}{\partial z} + \alpha|A| = \frac{1}{2ik}(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r})$ без учёта затухания.

Решение уравнения (1) можно представить в виде [2]:

$$P_H(z) = \frac{i\cdot\exp(-z/L_3)}{L_d}\int_0^z \frac{\exp(-(1-i\cdot\Delta)\cdot\alpha\cdot y)}{1-i(z-y)/L_d + y(2i\frac{L_d}{l_{d1}l_{d2}} + \frac{z}{l_{d1}l_{d2}})}dy, \qquad (2)$$

где $L_3 = \frac{1}{\alpha_-}$ – длина зоны затухания ВРЧ, α_- – коэффициент затухания для ВРЧ, $l_3 = \frac{1}{\alpha}$ – длина зоны затухания волн накачки, $l_{d1} = a^2\omega_1/2c_0$, $l_{d2} = a^2\omega_2/2c_0$ – длина зоны дифракции для волн накачки; $L_d = a^2\Omega/4c_0$ – длина зоны дифракции для разностной частоты, ω_1, ω_2 – круговые частоты волн накачки, Ω – разностная круговая частота. Под величиной P_H понимается приведённая амплитуда ВРЧ, равная $P_H = P_- \cdot \frac{8\cdot c_0^2\cdot\rho_0\cdot p_{01}\cdot p_{02}\cdot a^2}{\varepsilon\cdot\Omega^2}$.

Наличие пузырьков в воде приводит к резонансным явлениям: резонансному поглощению и рассеянию.

Резонансную частоту пузырька газа, находящегося у поверхности можно, определить по формуле [1]:

$$f_0 = (327/a_0)\cdot\sqrt{1+0{,}1\cdot z}\ , \qquad (3)$$

где a_0 – радиус пузырька в см, z – глубина, на которой находится пузырёк, в м.

На рис. 1 построен график зависимости резонансной частоты пузырька от его размеров при нахождении пузырька на глубине z = 1 м.

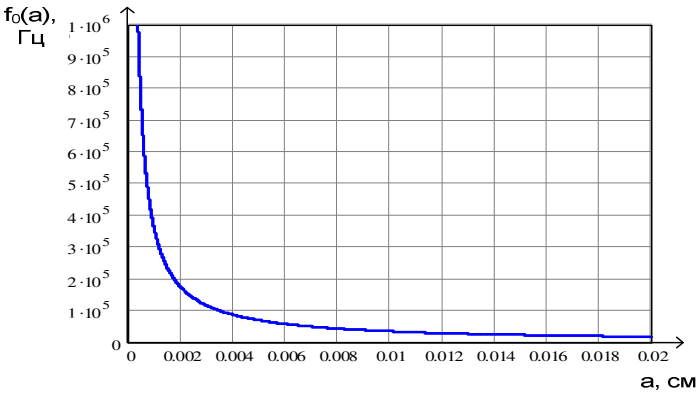


Рисунок 1 – График зависимости резонансной частоты пузырька от его размера при нахождении пузырька на глубине 1 м

Зависимость скорости звука от частоты при нахождении в единице объёма воды *n* пузырьков радиусом *a* находится по формуле [1]:

$$c`(f) = c_0 \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot U \cdot Z^2 \cdot D}{2 \cdot k_0^2 \cdot a_0{}^2 \cdot \left(D^2 + \delta^2 \right)} \right], \qquad (4)$$

где $U = \frac{4}{3}\pi \cdot n \cdot a_0{}^2$ - относительный объём воздуха в воде, $Z = \frac{f_0}{f}$,

$D = Z^2 - 1$, $k_0 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_0}{c_0}$ – резонансное волновое число.

Формула (4) несложно приводится к случаю, когда в среде находится совокупность пузырьков различных размеров, посредством замены *U* на *u(a)da* и интегрирования по а от x_1 до x2 [1]:

$$c(f) = c_0 \cdot \left[1 - \int_{X_1}^{X_2} \frac{3 \cdot u(a) \cdot Z^2 \cdot D}{2 \cdot k_0^2 \cdot a_0{}^2 \cdot \left(D^2 + \delta^2\right)} da \right], \qquad (5)$$

где $u(a)da$ – относительный объём воздуха, приходящийся на пузырьки с радиусами от x_1 до x_2.

На рис. 2 приведена зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при трёх различных концентрациях воздушных пузырьков ($n=10^2$, $5 \cdot 10^2$, 10^3) радиусом от $2 \cdot 10^{-5}$ см до $2 \cdot 10^{-3}$ см.

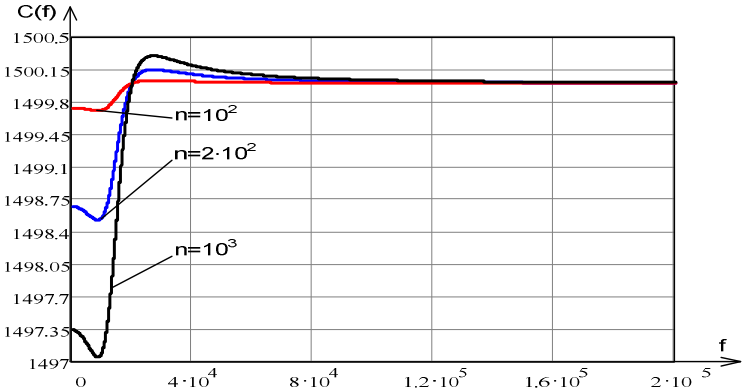


Рисунок 2 – Зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при концентрации воздушных пузырьков $n=10^2$, $5 \cdot 10^2$, 10^3 и радиусах пузырьков от $2 \cdot 10^{-5}$ см до $2 \cdot 10^{-3}$ см

На рис. 3-5 приведено осевое распределение волны разностной частоты в воде с распределёнными в ней пузырьками воздуха диаметром от $4 \cdot 10^{-5}$ см до $4 \cdot 10^{-3}$ см, при концентрации пузырьков $n=10^3$. График осевого распределения ВРЧ строился на рис. 3 при следующих параметрах: F=10 *кГц*, f_1=100 *кГц*, f_1=110 кГц, $a/\lambda=30$, $\rho_0 = 1000\ кг/м^3$, c_1=1500м/с, c_2=1500м/с, c=1497м/с, $\alpha_- = 3.874 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 1.448 \cdot 10^{-4}$, $L_d = 1{,}679\,м$, $l_{d1} = 33{,}51\,м$, $l_{d2} = 36{,}861\,м$, $L_3 = 2{,}581 \cdot 10^4\,м$,

$l_3 = 6{,}906 \cdot 10^3\, м$. При этих параметрах изменение фазового сдвига между взаимодействующими волнами на расстоянии пропорциональном l_3 $\Delta = -580$.

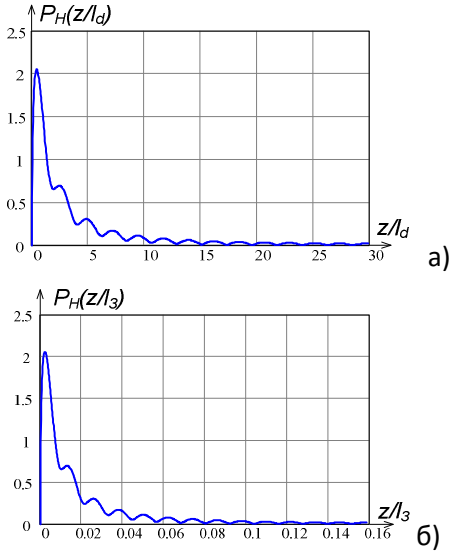


Рисунок 3 – Осевое распределение волны разностной частоты при F=10*кГц*, f_1=100*кГц*, f_2=110*кГц*

График осевого распределения ВРЧ строился на рис. 4 при следующих параметрах: F=10 *кГц*, f_1=200 *кГц*, f_1=210 *кГц*, a/λ=30, $\rho_0 = 1000\ кг/м^3$, c_1=1500м/с, c_2=1500м/с, c=1497м/с, $\alpha_- = 3.874 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 1.448 \cdot 10^{-4}$, $L_d = 0{,}481 м$, $l_{d1} = 19{,}183 м$, $l_{d2} = 20{,}142\, м$, $L_3 = 2{,}581 \cdot 10^3$ *м*, $l_3 = 7{,}042 \cdot 10^4\, м$. При этих параметрах изменение фазового сдвига между взаимодействующими волнами на расстоянии пропорциональном l_3 $\Delta = -5912$.

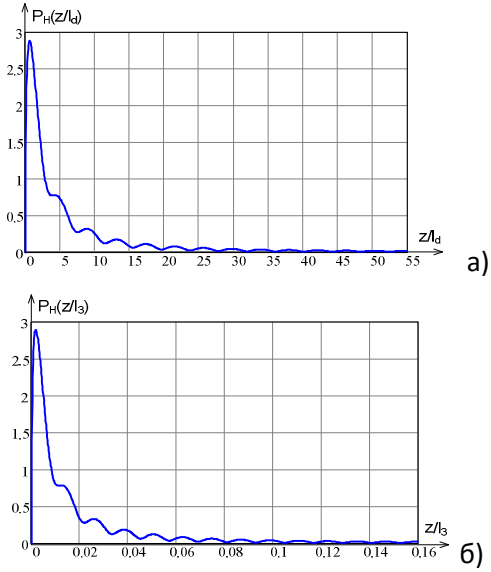
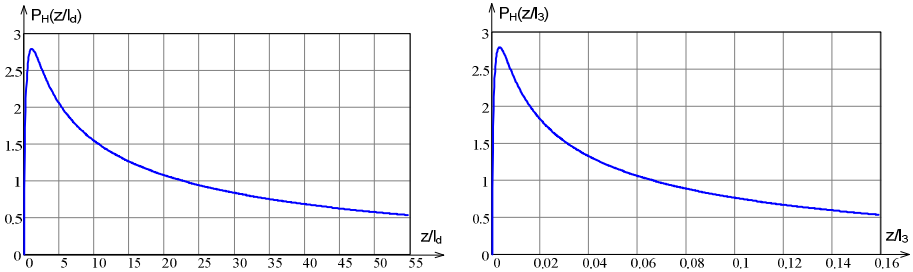


Рисунок 4 – Осевое распределение волны разностной частоты при F=10*кГц*, f_1=200*кГц*, f_2=210*кГц*

Интересен также случай, когда F=20 *кГц*. На рис. 6 изображено осевое распределение волны разностной частоты при следующих параметрах: F=10 *кГц*, f_1=200 *кГц*, f_1=220 *кГц*, $a/\lambda=30$, $\rho_0 = 1000\,кг/м^3$, c_1=1500м/с, c_2=1500м/с, c=1500м/с, $\alpha_- = 2.106\cdot 10^{-4}$, $\alpha = 1.448\cdot 10^{-4}$, $L_d = 0{,}959\,м$, $l_{d1} = 19{,}183\,м$, $l_{d2} = 21{,}101\,м$, $L_3 = 4{,}748\cdot 10^3\,м$, $l_3 = 7{,}042\cdot 10^3\,м$. При этих параметрах изменение фазового сдвига между взаимодействующими волнами Δ = 0, т.е. дисперсия отсутствует.



а) б)

Рисунок 5 – Осевое распределение волны разностной частоты при F=20*кГц*, f_1=200*кГц*, f_2=220*кГц*

Анализ результатов показывает, что наличие в водной среде пузырьков газа влияет на взаимодействие нелинейных акустических волн. Как видно из графиков, изображённых на рис. 2, скорость звука зависит от концентрации пузырьков в водной среде и от частоты распространения акустических волн, т.е. в среде присутствует дисперсия.

Как видно из графиков, изображенных на рис. 3 и 4, даже при малом изменении скорости звука на частоте ВРЧ и на частоте волн накачки (3 м/с) это явление значительно влияет на осевое распределение ВРЧ по сравнению со случаем отсутствия дисперсии (рис. 5).

Необходимо отметить, что максимумы в осевом распределении ВРЧ располагаются в различных точках на оси, что также говорит об изменении соотношения процессов генерации волн в среде и процессов уменьшения взаимодействий за счет дисперсии. Уменьшение амплитуды волны разностной частоты для каждой из компонент различно и для приведенного случая различается в несколько раз. Например, для 1-й компоненты на расстоянии 20ld от преобразователя накачки амплитуда в 10 раз меньше, чем в среде без дисперсии, а для 9 компоненты амплитуда меньше, чем в бездисперсионной среде в 20 раз.

Для генерации в точке пространства сигнала ВРЧ заданной формы необходимо формировать сигнал накачки с такими задержками, чтобы в этой точке сигнал ВРЧ складывался в фазе.

Сложение компонент сигнала волн разностной частоты в точке пространства зависит от амплитуд спектральных составляющих и их задержек в заданной точке пространства. Так, нулевые задержки компонент относительно друг друга (одинаковые начальные фазы) и одинаковые амплитуды компонент дадут в сумме сигнал с огибающей во временной области типа sin x/x, т.е. с максимумом в огибающей. Другие соотношения уменьшают этот максимум.

Для генерации в дисперсионной среде максимальной амплитуды сигнала на заданном расстоянии необходимо провести задержки компонент сигнала накачки таким образом, чтобы в этой точке пространства компоненты волны разностной частоты сложились в фазе, т.е. пришли в эти точки без задержек одной компоненты относительно другой.

Из вышеизложенного следует, что при работе параметрических антенн в приповерхностном слое океана необходимо учитывать наличие в этом слое пузырьков газа.

Библиографический список

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.

2. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону «Росиздат», 2004.

3. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.

4. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1990.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, к.т.н., доцент.

Воронин Василий Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н., профессор.

Бондарева Жанна Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант 1-го года обучения.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor.

Voronin Vasiliy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the

department of Hydroacoustic and medical engineering, Doctor of Engineering Sciences, Professor.

Bondareva Jeanne Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, postgraduate student of 1-th course.

УДК 534.7

А. Ю. Вареникова, Н.Н. Чернов
Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ СТРУКТУР БИООБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН СО СРЕДОЙ

Ультразвуковые методы определения характеристик биотканей являются одними из самых распространенных методов диагностики. Несмотря на свои преимущества, УЗ недостаточно информативны. Для повышения информативности предлагается восстановление интегрального нелинейного параметра и коэффициента отражения акустических волн повышенной интенсивности.

Ключевые слова: *ультразвуковая визуализация, нелинейное взаимодействие, биологические ткани, гармоники сигнала.*

Ultrasonic methods for determining characteristics of biological tissues are one of the most common methods of diagnosis. Despite its advantages, ULTRASOUND is not sufficiently informative. To improve the informative value of proposed restoration of integrated non-linear parameter and the reflection coefficient of acoustic waves of high intensity.

Key words: *ultrasound imaging, nonlinear interaction, biological tissue, harmonic signal*

Ультразвуковые (УЗ) методы определения характеристик биотканей включают в себя оценку её структуры или функционального состояния по данным ультразвукового зондирования. Если структурную информацию можно однозначно связать с определенным типом биотканей в норме или патологии, то эти характеристики можно использовать как для уточнения диагноза, так и для анализа влияния других факторов, например, для контроля состояния больного в процессе лечения [1]. Существенным недостатком применяемых в настоящее время УЗ методов интроскопии, основанных, в большинстве случаев, на приближении линейной акустики, является их сравнительно малая информативность для диагностики, поскольку патологические изменения слабо сказываются на изменении линейных акустических характеристик биологических тканей [4].

Помимо этого, ультразвуковым методам присущи следующие недостатки:

– существенные ограничения в исследовании ряда органов и систем**;**

– зависимость качества получаемого изображения от класса аппарата;

– ультразвуковые волны, подчиняясь законам Снеллиуса, не позволяют определить координаты расположения патологий и новообразований.

Применение контрастных веществ позволило увеличить информативность ультразвуковых методов, однако, внутривенно вводимые контрасты достаточно быстро распадаются, что значительно ограничивает время ультразвукового исследования [2].

Для того, чтобы метод представлял практическую ценность, необходимо достаточно четко определить и разграничить свойства тканей в норме и при патологии так, чтобы в пределах любого типа

биоткани или ее патологии не было заметных вариаций изменяемых параметров и значительного перекрытия в характеристиках любых типов тканей или патологии, которые подлежат дифференциации [1].

Решение данных проблем требует очень мощных вычислительных средств, сложного математического аппарата из-за зависимости импедансов биологических тканей от двух параметров: плотности ρ и скорости ультразвуковых колебаний *C*. Также необходимо создание достаточно высокого входного отношения сигнал/помеха в системе.

Одним из направлений решения данной проблемы является прямое построение изображения из множества двумерных томограмм. Однако это связано со следующей проблемой: двумерная томограмма, полученная путем ультразвуковых эхо-импульсов, имеет конечную толщину: изображение биологического объекта с линейными размерами в десятки сантиметров требует применения ультразвуковых полей с частотой от 1 МГц и длиной волны в 1 мм. Более высокие частоты сильно поглощаются, толщина h озвученного слоя не может быть меньше значения $h \geq \sqrt{L\lambda_0}$, где L – протяженность зоны, равная диаметру томографируемой области. Томография в одной плоскости ограничивает разрешение в направлении, перпендикулярном к плоскости, диаметром лучевой трубки, то есть значением $\sqrt{L\lambda_0}$. В результате получаемое изображение имеет резко различное разрешение в плоскости исходных томограмм. Повышение разрешения не является строгим решением задачи: пренебрегают волновым обменом между слоями, который может быть существенным в случае контрастных рассеивателей сравнительно малых волновых размеров.

Другой важной проблемой является то, что исходные двумерные томограммы не вполне независимы. Они связаны рассеянными полями, которые переходят из слоя в слой и создают взаимные искажения.

Для решения перечисленных проблем представляется возможным восстановление нелинейных характеристик тканей

исследуемого объекта при взаимодействии их с ультразвуковой волной. Нелинейный акустический параметр, широко используемый в ультразвуковых гидроакустических исследованиях дна и донных отложений, может быть полезным при зондировании внутренних структур организма: его применение может давать существенную диагностическую информацию о состоянии внутренних структур исследуемого объекта.

Относительное изменение значений нелинейных параметров в патологически измененной ткани, по сравнению со здоровой, существенно превышает одновременное изменение её линейных характеристик.

Высокая информационная ценность восстановления картины распределения нелинейных акустических характеристик заставляет вести поиски надежных, эффективных и, вместе с тем, достаточно простых методов восстановления распределения акустического нелинейного параметра среды ε (r). Методы, применяемые в настоящее время для нахождения нелинейных характеристик объекта, основаны, в большинстве случаев, на лучевом приближении и используют картину роста второй гармоники или сигнала комбинационной частоты по мере распространения волны, или взаимодействие в луче высокочастотной пробной волны с мощным импульсом накачки [3].

Перспективным представляются восстановление распределения интегрального нелинейного параметра и расчет коэффициента отражения акустических волн повышенной интенсивности для оценки вкладов нелинейностей в величину интегрального коэффициента отражения. Интегральный нелинейный параметр по физическому смыслу является ускорением в среде при единичном давлении. Данный параметр позволит оценить искажение профиля акустической волны, что, в свою очередь, даст возможность обнаружить местоположение и, вероятно, тип патологического новообразования.

Коэффициент отражения акустических волн повышенной интенсивности достаточно чувствителен к изменениям нелинейных параметров, что позволит выявить характер влияния нелинейности на интегральный показатель даже при небольших изменениях. Это очень важно для медицинских целей: такие показатели дадут возможность ранней и, что очень важно, точной постановки диагноза.

Исследование в области оценки 1-й и 2-й гармоник при взаимодействии ультразвукового сигнала требует дальнейшей работы и выбора оптимального способа визуализации структур на основе нелинейного взаимодействия с ультразвуковыми колебаниями.

Библиографический список

1. Физика визуализации изображений в медицине, в 2х томах Т.2. Пер. с англ./под. ред. С. Уэбба. – М.: Мир, 1991 – 408 с.
2. Gebel M.J. Contrast media and 3D-Ultrasound EFSUMB Post-graduate Course in Vascular Doppler / Ed. by Bolondi L., Gaiani S. Bologna: Timeo, 1999. P.27-28.
3. Буров В.А., Евтухов С.Н., Ткачева А.М., Румянцева О.Д. Акустическая томография нелинейного параметра с помощью малого числа преобразователей.// Акустический журнал. – 2006 - № 6.- т. 52.- С.760-776
4. Шмелев А.А. Акустическая томография распределения нелинейных параметров рассеивателя на основе эффектов третьего порядка: Автореф. диссертации на соискание ученой степени канд. физ-мат. наук. – М., 2011. – 26 с.

Вареникова Анастасия Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: rebelludwig@gmail.com, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44,

тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант 2-го года обучения.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Varenikova Anastasia Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail:rebelludwig@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, postgraduate student.

Chernov Nikolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 534.7

А.Ю. Вареникова, Н.Н. Чернов

Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННИХ СТРУКТУР БИООБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ 2-Й ГАРМОНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

В статье рассмотрены свойства В-изображений, получаемых на основной гармонике и на втором гармоническом сигнале. Показано,

что изображение, полученное на основе второй гармоники, более четкое, нежели изображение, построенное на основе основной частоты. Свойства В-изображений говорят о том, что визуализация амплитуды эхо-сигналов не является лучшим способом отображения информации, содержащейся в ультразвуковых сигналах.

Ключевые слова: *внутренние структуры биообъектов, вторая гармоника, гармонический сигнал, метод конечных амплитуд*

The article describes the properties of images obtained at the fundamental and the second harmonic signal. It is shown that the image obtained based on the second harmonic, clearer than the image constructed on the basis of the fundamental frequency. Properties In images suggests that the visualization of the amplitude of the echo signals is not the best way to display the information contained in the ultrasonic signals.

Key words: *the internal structure of biological objects, second harmonic, the harmonic signal, the method of finite amplitudes*

Исследование проявлений нелинейного поведения акустических волн показало, что процесс распространения упругих волн нелинеен всегда, причиной тому является среда, в которой происходит распространение волны. При взаимодействии с веществом любой волновой гармонический процесс возбуждает в нем собственные колебания для которых характерна совокупность частот, кратных основной частоте, принятой от датчика. Вторая гармоника имеет частоту в 2 раза большую, чем основная. Третья гармоника имеет частоту в 3 раза большую. Регистрация сигнала на удвоенных, утроенных частотах приводит к повышению разрешающей способности в 2-3 раза, следовательно, повышается информативность методов исследования. Каждая последующая гармоника имеет гораздо меньшую амплитуду колебаний, чем основная, но современная техника позволяет выделить их, усилить и получить из них

диагностически значимую информацию в виде гармонического В-изображения. Преимущество гармонического В-изображения по сравнению с классическим В-изображением заключается в отсутствии большого количества артефактов, возникающих при прохождении сигнала по пути от датчика до интересующего объекта.

Гармонический же сигнал преодолевает путь только из глубины ткани, где он собственно и возник, до датчика. Особенно это очевидно, когда изображение строится исключительно на основе второго гармонического сигнала, без использования основной гармоники.

Изображение, полученное на основе второй гармоники, более четкое, нежели изображение, построенное на основе основной частоты, вследствие следующих причин (рис. 1):

- более короткие волны увеличивают разрешающую способность;
- для интенсивных волн зависимость отклика от амплитуды падающей волны имеет нелинейный характер;
- при фокусировке излучения на внутреннюю структуру оно усиливается в K >> 1 раз, отклик на второй гармонике увеличивается в K^2 раз.

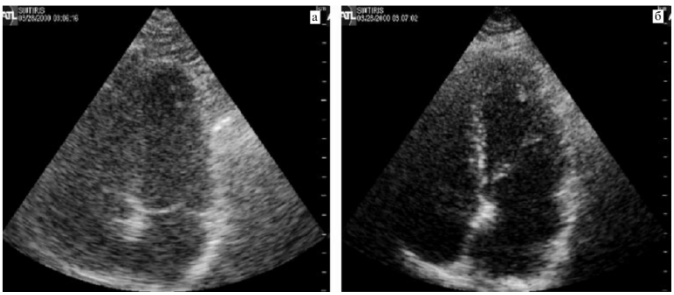


Рисунок – 1 Акустическое изображение структуры сердца, полученное на основной частоте зондирующего сигнала (а) и нелинейная визуализация на второй гармонике (б) [1]

В процессе формирования изображения возникают следующие моменты: когда ткань имеет случайно-неоднородную структуру, характеризующуюся малым радиусом корреляции, то статистические свойства первого и второго порядков не зависят от структуры ткани. Статистические параметры первого порядка определяются рэлеевским распределением, во втором порядке они зависят от характеристик исходного импульса. Отношение сигнала к шуму является константой, малые отклонения от среднего уровня рассеяния подавляются шумом.

Такие свойства В-изображений говорят о том, что визуализация амплитуды эхо-сигналов не является лучшим способом отображения информации, содержащейся в ультразвуковых сигналах.

Определенные перспективы в развитии представлений о процессах построения изображений открываются при помощи методов реконструкции акустических параметров ткани. Помимо восстановления количественных показателей, данные методы характеризуются более высоким пространственным разрешением по сравнению с обычным В-сканированием [2].

Акустические нелинейные параметры биологической ткани, проявляющиеся в эффектах нелинейного взаимодействия со средой, несут информацию о нелинейных упругих свойствах ткани, т.е. о нелинейной зависимости плотности ткани от приложенного к ней давления. Эти свойства дополняют информацию о ткани новыми сведениями, не содержащимися в ее линейных акустических характеристиках.

Одним из методов восстановления нелинейных характеристик является метод конечных амплитуд, который основан на измерении величины второй гармоники при контролируемых условиях распространения акустической волны [4-5]. Измеряются амплитуда второй гармоники и амплитуда первичной волны, а также их поглощение, по которым далее вычисляется нелинейный параметр. Со временем этот метод был усовершенствован и стал использоваться совместно с методом замещения, что повысило точность измерений и

избавило экспериментаторов от ряда «лишних» измерений (например, абсолютных величин давлений). Так (при использовании метода замещения), по серии сравнительных измерений амплитуды второй гармоники в среде с известным нелинейным параметром и, затем, в исследуемом образце, нетрудно получить значение нелинейного параметра образца.

Схемы измерения нелинейного параметра, основанные на измерении амплитуды второй гармоники или комбинационной волны, обладают отличающимися свойствами. В работе [3] было исследовано влияние эффектов дифракции и поглощения для режимов работы на второй гармонике и на разностной частоте в зависимости от положения исследуемого объекта между преобразователями и приемником. Было показано, что поглощение второй гармоники не зависит от местоположения объекта между излучателем и приемником, что позволяет использовать метод замещения без дополнительных поправок, достаточно «вычесть» из полученных данных вклад, вносимый водой. Для волны разностной частоты это не так, волна поглощается по-разному в зависимости от взаимного расположения объекта и преобразователей, поэтому в общем случае при томографическом восстановлении картины распределения нелинейного параметра требуется учитывать геометрию эксперимента. Что касается дифракции, то имеет место противоположная ситуация, когда более выгодно использовать волну разностной частоты. Дело в том, что ввиду искажений первичного плоского поля, вторичное поле получается неплоским в результате набегов фаз, и если для волны второй гармоники набег фазы удваивается (а значит, форма искажается еще сильнее), то для волны разностной частоты фазы первичных сигналов вычитаются, что делает пучок практически неизменным.

Таким образом, к настоящему моменту большинство существующих схем томографирования основано на лучевом приближении. В измерениях используется линейная зависимость роста амплитуды второй гармоники или сигнала комбинационной

частоты от значения нелинейного параметра и пройденного расстояния, или взаимодействие в луче высокочастотной пробной волны с мощным импульсом накачки. И хотя техническая реализация подобных томографических систем относительно проста, они обладают такими существенными недостатками, как сравнительно невысокое пространственное разрешение (0.3-1 см) и длительное время сбора томографических данных**.** В связи с вышесказанным, задача поиска новых методов томографирования нелинейного параметра продолжает оставаться актуальной.

Библиографический список

1. Применение ультразвука в медицине. Под ред. К. Хилла Перевод с английского под редакцией Л.Р. Гаврилова, В.А. Хохловой, О.А. Сапожникова. – М.: – ФИЗМАТЛИТ, 2008
2. О.В. Руденко Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения.// Успехи физических наук, том 177, № 4
3. Sato T., Mori E., Endo K., Yamakoshi Yo., Sase M. A few effective signal processing for reflection-type imaging of nonlinear parameter N of soft tissues // Acoustical Imaging. Plenum Press. New York. 1992. Vol. 19. P. 363-368.
4. Zhang D., Gong X.-F., Ye Sh. Acoustic nonlinearity parameter tomography for biological specimens via measurements of the second harmonics // J. Acoust. Soc. Am. 1996. Vol. 99. № 4, Pt. 1, P. 2397-2402.
5. Zhang D., Gong X.-F., Liu J.-H., Shao L.-Zh., Li X.-R., Zhang Q.-L. The experimental investigation of ultrasonic properties for a sonicated contrast agent and its application in biomedicine // Ultrasound in Med. & Biol. 2000. Vol. 26. № 2, P. 347-351.

Вареникова Анастасия Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: rebelludwig@gmail.com 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44,

тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант 2-го года обучения.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Varenikova Anastasia Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail:rebelludwig@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, postgraduate student.

Chernov Nikolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 627.71, 534.222.2

В.Ю. Волощенко

НЕЛИНЕЙНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ГИДРОСАМОЛЕТОВ

Рассмотрен принцип работы и структурная схема нелинейной ультракороткобазисной гидроакустической навигационной системы, которая позволяет РТК на беспилотном гидросамолете (БГС)-носителе в надводном положении на акватории

летного бассейна гидроаэродрома в условиях ограниченной видимости как определять направление на донный источник сигнала с необходимой точностью, так и оценивать его удаленность.

Ключевые слова: *навигация в надводном положении беспилотного гидросамолета (БГС)-носителя РТК, нелинейная ультракороткобазисная гидроакустическая навигационная система. нелинейная акустика*

The paper presents the operation principle and block diagram of the nonlinear ultra- short base hydroacoustic direction and range finder , which allows to the pilotless amphibian aircraft' robotic system on shallow-water seadrome at cloudiness meteorological conditions to sense on tone finite amplitude signal's source (for example, sonar beacon-pinger) and to compute the range for it. .

Key words: *over-water navigation of pilotless amphibian aircraft' robotic system, the nonlinear ultra- short base hydroacoustic direction and range finder*

В [1] отмечена актуальность разработки технологии навигации и наведения робототехнических комплексов (РТК), в частности комплексной навигации, предусматривающей использование локальных полей и ориентиров, включающих средства оценки параметров перемещения и обзора подводного пространства в надводном положении с беспилотных гидросамолетов (БГС) – носителей РТК на акватории летного бассейна (ЛБ) гидроаэродрома с использованием технического зрения, в том числе высокоточного гидроакустического навигационного оборудования с использованием эффектов нелинейной акустики:

1) эхо-импульсных гидролокаторов и эхолотов ближнего действия с параметрическим трактом излучения [2];

2) многочастотного корреляционного (доплеровского) лага с регулируемой точностью измерения скорости движения [3-5];

3) ультракороткобазисных гидроакустических навигационных систем с донными гидроакустическими маяками, которые снабжены параметрическими излучающими антеннами [6-8].

Для обеспечения местоопределения в условиях ограниченной видимости (низкая облачность, маскирующее действие гидрометеоров, ночное время и т.д.) при надводном движении БГС-носителей РТК на акватории ЛБ гидроаэродрома судов по маршруту, безопасному для плавания, например при проводке по определенному фарватеру в пределах узкости и гавани, входе в поворот и т.п., могут быть использованы навигационные системы с гидроакустическими донными маяками, в частности пеленгационные с ультракороткой базой [6-8]. В маяке-пингере (рис. 1) блоки подключены к источнику питания 1, и генератор 2 вырабатывает гармонический сигнал с частотой f, который через хронизатор-модулятор 3, усилитель мощности 4 поступает на электроакустический преобразователь (ЭАП) 5, входящий в состав ПАУ, [9] излучающий импульсный зондирующий сигнал накачки в водную среду. При распространении в среде мощный акустический сигнал с амплитудой звукового давления P_1 и частотой f по мере распространения испытывает накапливающиеся искажения волнового профиля, что физически означает генерацию высших гармонических компонент с частотами $2f, 3f, ...nf$, амплитуды звуковых давлений которых равны $P_2, P_3, ...P_n$ [1]. Таким образом, маяк-пингер осуществляет излучение в импульсном режиме по заданной программе, формируя необходимые по остроте соосные основные лепестки ХН ЭАП 5 как на исходном сигнале накачки, так и сигналах кратных частот, которые сориентированы в пространстве в заданном направлении. Приемная бортовая аппаратура БГС-носителя РТК функционально включает в себя два n- канальных приемных тракта, в которых обрабатываются электрические сигналы $U1, U2$, вырабатываемые двумя группами ЭАП 6,7 (рис.1). Обе группы имеют идентичные основные лепестки ХН без дополнительных максимумов, которые сдвинуты

относительно друг друга на угол $2\varphi_{см}$ (рис.2,а), где $\varphi_{см}$ = (0,5–0,7)× $\theta_{0,7f}$, $\theta_{0,7f}$ – ширина основного лепестка ХН группы ЭАП для сигнала накачки по уровню 0,7.

Пеленгование методом равносигнальной зоны осуществляется путем определения разности напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$ (- ◦ - 1′,2′, - ▫ - 1″, 2″ на рис. 2, а) на выходах двух идентичных каналов приемных трактов, в которых обрабатываются электрические сигналы одинаковых рабочих частот (или f или $2f$ …. или nf), величина которой изменяется при пеленговании источника сигнала 5 за счет поворота двухлепестковой ХН групп ЭАП 6,7 компенсатором 8.

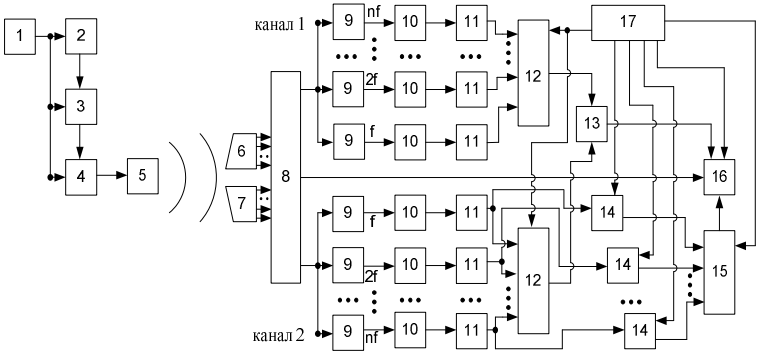
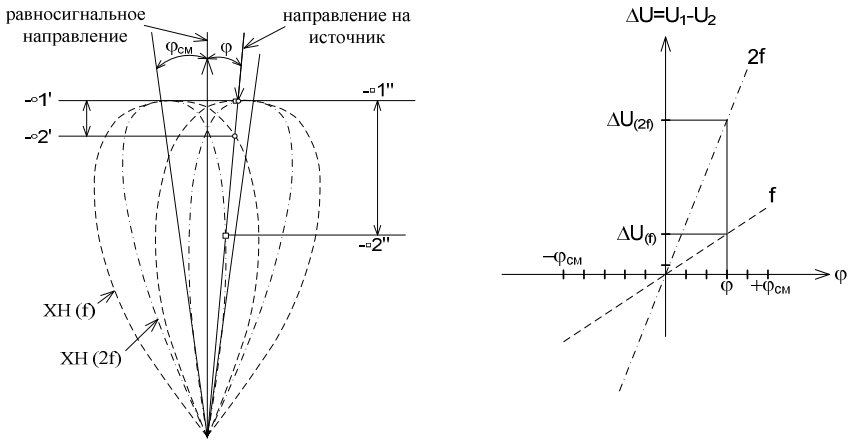


Рисунок 1 – Структурная схема короткобазисной навигационной системы [6,7]

Перестройка компенсатора 8 осуществляется РТК автоматически с последующим слежением за маяком-пингером. При нахождении источника на линии, проходящей через точку пересечения основных лепестков характеристик направленности обеих групп акустических преобразователей и называемой линией равносигнального направления, электрические сигналы обоих каналов равны (или $U_{1(f)} = U_{2(f)}$ или $U_{1(2f)} = U_{2(2f)}$ …..), и напряжение ΔU

будет равно нулю, что и будет регистрироваться устройством отображения информации 16. Напряжение, пропорциональное величине угла поворота $\Delta\varphi$ равносигнального направления групп ЭАП, с дополнительного выхода компенсатора 8 поступает на первый вход устройства отображения информации 16, которое индицирует информацию об угловой координате пеленгуемого маяка-пингера.



а) б)

Рисунок 2 – ХН групп ЭАП 6,7 (а) и пеленгационные характеристики метода равносигнальной зоны на частотах f (- - -), $2f$ (- · -·· -) (б) [6,7]

В предлагаемом устройстве пеленгование осуществляется на нескольких акустических сигналах с частотами $f, 2f, ...nf$, что позволит регулировать точность пеленгования маяка-пингера. Пеленгационные характеристики метода равносигнальной зоны на частотах f (- - -), $2f$ (- · -·· -) для предлагаемого устройства представлены на рис.2,б. Как видно из чертежа, крутизна пеленгационной характеристики $S = dU(\varphi)/d\varphi$, а, следовательно, и пеленгационная чувствительность максимальны при ориентации

линии равносигнального направления на цель (в этом случае $\Delta U = 0$), причем, для сигнала второй гармоники $2f$ пеленгационная чувствительность выше, чем для сигнала основной частоты. Это обусловлено величиной разности напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$ (- ∘ - 1′,2′, ΔU_f; - ▫ - 1″, 2″, ΔU_{2f}) для любого угла $\Delta\varphi$ отклонения от линии равносигнального направления, что определяется обострением основных лепестков ХН групп ЭАП 6,7 в режиме приема для более высокочастотных сигналов.

Таким образом, использование в локационной системе сигнала накачки с частотой f, а также высших гармоник nf волн накачки, обрабатываемых в n двухканальных цепочках, содержащих последовательно включенные полосовые фильтры (9), настроенные на частоты $f, 2f, ..., nf$, усилители (10) и детекторы (11) и затем подаваемых попарно через n-входовые аналоговые ключи 12 на входы вычитающего устройства 13, выход которого соединен со вторым входом устройства отображения информации 16, позволяет осуществить пеленгование маяка-пингера методом равносигнальной зоны с требуемой точностью, возрастающей для более высокочастотных сигналов, что обусловлено уменьшением ширины основных лепестков характеристик направленности по уровню 0,7 групп преобразователей устройства. Выбор того или иного рабочего сигнала осуществляется путем подачи с блока управления 17 сигналов на управляющие входы n- входовых аналоговых ключей 12, что в свою очередь определяется необходимой точностью определения местоположения донного маяка-пингера с БГС-носителя РТК. С выходов детекторов 10 соответствующих n цепочек второго канала видеоимпульсные сигналы $U_{2(f)}, U_{2(2f)}, ...U_{2(nf)}$ поступают на входы измерителей амплитуд 14, регистрирующих амплитуды сигналов основной частоты f пеленгуемого маяка-пингера и сформировавшихся высших гармоник $2f, 3f, ..., nf$ в момент точного его пеленгования. По соотношению уровней сигналов

$U_{2(f)}, U_{2(2f)}, ...U_{2(nf)}$ (и соответственно звуковых давлений $P_1, P_2, P_3, ...P_n$) с помощью вычислительного блока 15 определяют расстояние z до маяка-пингера, затем полученная информация поступает на третий вход устройства отображения информации 16. Управляющие входы устройства отображения информации 16, вычислительного блока 15 и измерителей амплитуд 14 соединены с выходами блока управления 17.

Библиографический список

1. http://fpi.gov.ru/ (дата обращения 10.12.15)

2. Волощенко В.Ю. Параметрические локаторы для ближнего подводного эхопоиска. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH, OmniScriptum & Co. KG, Heinrich-Bocking-Str. 6-8 66121, Saarbrucken, Germany, https://www.ljubljuknigi.ru/store/ru/book/isbn/978-3-659-48014-0, 137 с.

3. Пат. № 98254 РФ G01S 15/00 Многочастотный корреляционный гидроакустический лаг/Волощенко В.Ю., Редин А.А., Волощенко А.П., Тарасов С.П. ФГОУ ВПО «ЮФУ».-Заявл. 11.01.2010г.;Опубл.10.10.2010, Бюл №28.– 2 с.

4.Пат.75062 РФ МКИ G01S 15/00 Доплеровская локационная система/ Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. и др ФГОУ ВПО «ЮФУ»-Опубл.20.07.2008. Бюл. №20. – 6 с.

5. Пат. 79187 РФ МКИ G01S 15/00 Многоуровневая импульсная доплеровская навигационная система / Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. и др ФГОУ ВПО «ЮФУ» - Заявл. 2.07.2008, Опубл.20.12.2008 г. Бюл.№35. – 5 с.

6. Пат. 2138059 РФ МКИ G01S 3/00, 3/80, 15/08 Акустический пеленгатор/ Волощенко В.Ю. ТРТУ(РФ).-Опубл.20.09.1999,Бюл.№ 26–3с.

7. V.Y.Voloshchenko. The multifrequency sonic direction and range finder /17-th Int. Cong.of Sound and Vibr.: Cong. Proc., Cairo 18-22 July 2010, P.235–239.

8. Пат.№ 86321 РФ G01S 15/00 Многочастотная навигационная система /Волощенко В.Ю.,Волощенко А.П. и др.-ТНТК,Опубл.27.08. 2009,Бюл.№24–3с.

9. Пат. № 104732 РФ G01S 15/00 Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство / Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., ФГОУ ВПО «ЮФУ» (РФ).Заявл.03.12.2010г.; Опубл.20.05.2011, Бюл №14 – 4 с.

Волощенко Вадим Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru Тел. 8(8634)371794, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, к.т.н., доцент.

Voloshchenko Vadim Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of radio-engineering systems and management, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru phone: 8(8634)371794, the Department of engineering drawing and computer design, Cand.Sc., Lecturer.

УДК 629.705, 534.222.2

П.Ю. Волощенко, В.Ю. Волощенко

РАДИО- И ГИДРОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ВЗЛЕТА И ПРИВОДНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ГИДРОСАМОЛЕТОВ

Предложено для обеспечения безопасного взлета и приводнения беспилотного гидросамолета (БГС) производить многопозиционный мониторинг как воздушного, так и водного приповерхностных слоев взлетно-посадочной полосы (ВПП) на

акватории гидроаэродрома с помощью РЛС и параметрических гидроакустических средств ближнего подводного наблюдения. Рассмотрены конструкции как приемоизлучающих многочастотных антенных устройств, располагаемых на донной поверхности мелководного летного бассейна, так и активных радиолокационных отражателей, устанавливаемых для увеличения их радиолокационной заметности на плавучих навигационных знаках, обозначающих ВПП.

Ключевые слова: *взлет и приводнение беспилотных гидросамолетов, многопозиционный радиолокационный и гидроакустический мониторинг ВПП гидроаэродрома, параметрическая излучающая антенна, активный радиолокационный отражатель*

The multiposition radar and hydroacoustic monitoring of near-surface aerial and aqueous landing strip's layers on shallow-water seadrome for the pilotless amphibian aircraft's safety take-off and water landing regimes by means of the microwave detecting radars and the parametric short-range surveillance system is suggested. The constructions of multifrequency transmitter-receiver antennas, which are located on shallow-water seadrome's bottom surface, and active reradiators, which can increase radar detectability of floating navigation markers for seadrome landing strips, are considered.

Key words: *the pilotless amphibian aircraft's take-off and water landing regimes; the multiposition radar and hydroacoustic monitoring of shallow-water seadrome's landing strip, the parametric transmitting array, an active reradiator*

В настоящее время актуальна разработка технологии навигации и наведения робототехнических комплексов (РТК), в частности комплексной высокоточной навигации, предусматривающих совместное использование как глобальных, так и локальных полей и ориентиров, включающих средства оценки параметров перемещения при выполнении взлетно-посадочных действий беспилотных

гидросамолетов (БГС)-носителей РТК с использованием технического зрения, в том числе гидроакустических и радиолокационных систем (РЛС) с малой длительностью цикла выполнения функций навигации, обеспечивающих высокоточное местоопределение носителя РТК в реальном времени [1].

В [2] изложен опыт развертывания гидроаэродрома «Дубна» для пилотируемых ГС, где подготовлена отвечающая нормам безопасности ВПП. Функционирование гидроаэродрома обеспечивает применение двух систем: спутниковой навигации (наземная контрольно-корректирующая станция, автоматизированное рабочее место диспетчера, бортовые средства пилотируемого ГС) и светосигнального оборудования (световозвращающие плавучие маркерные знаки для разметки ВПП). Следует отметить, что вторая система эффективна для «традиционного» визуального осмотра надводной части ВПП с борта пилотируемого ГС перед приводнением лишь в условиях достаточной атмосферной видимости, причем, для беспилотных гидросамолетов (БГС)-носителей РТК данная операция неприменима.

Эффективность взлетно-посадочных действий беспилотных гидросамолетов (БГС)-носителей РТК может быть обеспечена посредством осуществления многопозиционного мониторинга как водного, так и воздушного приповерхностных слоев ВПП на акватории гидроаэродрома с помощью РЛС и ГАС ближнего подводного наблюдения. Оперативность гидроакустического мониторинга ВПП может быть обеспечена при одновременном ультразвуковом зондировании в направлении «снизу вверх» ее частей, отображении и анализе полученных данных, причем, помехи взаимного влияния соседних ПАУ [3] снижены за счет использования «индивидуальных» наборов частот локационных сигналов, формирующихся в водной среде за счет эффектов нелинейной акустики. С целью оперативного прояснения подводной обстановки [4] на ЛБ гидроаэродрома необходимо оборудовать дно прибрежного участка водной акватории 2 стационарными ПАУ 4 (×) (рис.1).

Девять ПАУ (×) расположены вдоль осей четырех (по три ПАУ в каждой ВПП), выбор требуемой определяется направлением ветра 3. ВПП 1 соединены с береговым оборудованием службы гидроаэродрома, которое обеспечивает формирование зондирующих сигналов, обработку, регистрацию и отображение полученной информации.

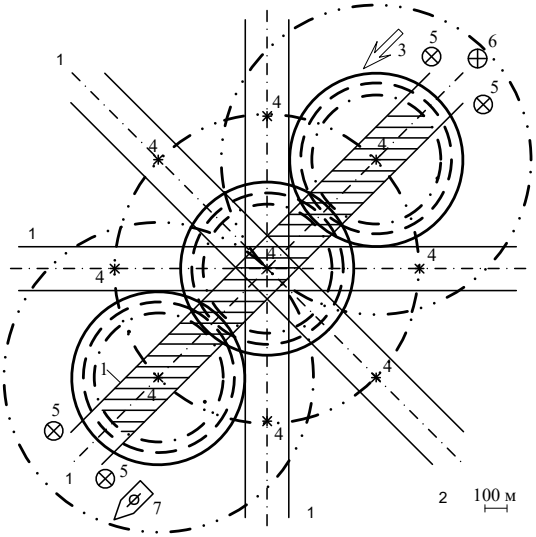


Рисунок 1 – Разметки акватории ЛБ гидроаэродрома

Расположение ПАУ(×) на дне акватории позволяет подключать их в необходимой последовательности, что определяется выполнением поставленной задачи, например проведение ультразвукового эхопоиска в водном объеме ВПП (рис. 1: 1- ВВП («озвучиваемая» заштрихована), 2-ЛБ в масштабе «1 клетка-100 метров», 3 - направление ветра; 4 - ПАУ (×), концентрические окружности – дальность действия ПАУ(×) (– • • на сигнале низкой частоты, ——, – – –, – • – • на сигналах высокой частоты), 5-плавучие маркерные знаки (края ВПП ⊗, на рис.1 слева внизу расположено начало ВПП, а справа вверху – конец ВПП), 6 –

курсовой маяк (ось ВПП ⊕, расположен вблизи конца ВПП), 7 – СВП (знак зоны приводнения ∅, расположено носом по ветру вблизи начала ВПП); осуществление текущего эхопоиска на периметре ЛБ гидроаэродрома или пассивный режим наблюдения дальней подводной обстановки в шельфовой зоне, примыкающей к акватории (рис. 2 – задействованы внешние ПАУ 4 (×) всех ВПП), и т.д.

Гидроакустическая аппаратура службы обеспечения гидроаэродрома долговременного базирования, используемая для многопозиционного подводного наблюдения на мелководной прибрежной акватории, решает следующие задачи:

1) своевременное обнаружение опасных притопленных или находящихся на водной поверхности объектов нейтральной плавучести;

2) дистанционное получение данных о состоянии водного объема (глубина, направление и скорость течения водных масс), границы раздела «вода-воздух» (высота, скорость и направление движения ветровых волн – режим волнографа), границы раздела «вода-лед» (толщина льда – режим эхоледомера) в различных точках акватории;

3) фиксирование скрытных подводных проникновений на акваторию как летного бассейна гидроаэродрома, так и окружающего его прибрежного шельфа.

В воздушном приповерхностном слое летного бассейна вероятность обнаружения элементов разметки ВПП (плавучий маркерный знак, плавучий курсовой маяк, СВП) с помощью РЛС как с береговых постов гидроаэродрома, так и с борта БГС носителя РТК снижается в результате образования маскирующих помех за счет отражений электромагнитных волн (ЭМВ) от поверхности моря, береговой полосы, а также от неоднородностей в атмосфере. Одним из новых направлений в технике СВЧ диапазона является разработка активных радиолокационных отражателей (АРЛО), объединяющих пассивный излучатель электромагнитного поля (ЭМ) и негатроны – электронные приборы с отрицательным сопротивлением, например

лавинно-пролетные диоды (ЛПД) [5, 6], в виде одного модуля, осуществляющего прием и передачу, усиление и преобразование сигналов, применяемого для улучшения распознаваемости на экране РЛС транспортных средств (малоразмерных и малотоннажных плавсредств), навигационных знаков (буев, бакенов, маяков) и т.д. Оснащение подобными регенеративными микроволновыми устройствами позволяет, в сравнении с известными типами пассивных РЛО, регулировать характеристики отражателей за счет изменения параметров электронного прибора: модулировать и увеличить эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) объекта наблюдения, расширить и варьировать рабочую полосу частот, уменьшить вес и габариты РЭА. Таким образом, эффективность радиолокационного распознавания надводной части ВПП при облучении как с борта БГС носителя РТК, так и с береговых постов гидроаэродрома достигается за счет размещения АРЛО с круговой диаграммой рассеяния в верхней полусфере на плавучих объектах: маркерных знаках (края ВПП), курсовом маяке (ось ВПП), СВП, а также береговых постройках. АРЛО обеспечивают (в угломестной и азимутальной плоскостях) когерентное переизлучение в обратном направлении зондирующих сигналов РЛС, которые усилены по мощности, что увеличивает их заметность при радиолокационном наблюдении в условиях ограниченной видимости, повышает распознаваемость объектов оператором на экране РЛС.

По мнению авторов, проведение комплексного многопозиционного мониторинга, радиолокационного и гидроакустического как надводного, так и подводного объема акватории ЛБ гидроаэродрома [7] позволит береговой службе обеспечения своевременно иметь достаточный объем информации (координаты береговых объектов, плавучих маркерных знаков, курсового маяка, СВП и т.п.) о состоянии ВПП, на основании которой принимается то ли иное решение, сообщаемое по радиоканалу на борт как экипажу СВП, так и через наземную контрольно-

корректирующую станцию гидроаэродрома на борт БГС носителю РТК, готовящемуся к выполнению взлетно-посадочных действий.

Библиографический список

1. Волощенко П.Ю. Исследование модуляции рассеянного поля отражателя с рупорной антенной на лавинно-пролетном диоде [Текст] // Радиотехника и электроника, 1999. - т.44. №4. –С.482-484.

2. Волощенко Ю.П. Эталонный отражатель, интегрированный с усилителем на ЛПД // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия ОВР. – Москва – Таганрог, 2003. – Вып. 1. – С.176 – 178.

3. Пат. № 104732 РФ G01S 15/00 Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство / Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., ФГОУ ВПО «ЮФУ» (РФ). Заявл.03.12.2010г.; Опубл.20.05.2011, Бюл №14 – 4 с.

4. Пат. № 2464205 РФ B 64F 1/00 Способ подготовки летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета/ Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., Ли В.Г., ФГАОУ ВПО «ЮФУ» (РФ). Заявл. 01.04.2011г.; Опубл. 20.10.2012, Бюл. №29 – 22 с.

5. Пат. № 2539039 РФ B 64F 1/00 Способ подготовки взлетно-посадочной полосы летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета / Волощенко В.Ю., Волощенко П.Ю.(РФ), ФГАОУ ВПО «ЮФУ» (РФ). Заявлено 27.06.2013г.; Опубл. 10.01.2015, Бюл. №1 – 29 с.

6. http://fpi.gov.ru/ (дата обращения 10.12.15)

7.http://www.aviajournal.com/arhiv/2000_2002/magazine/200210/st1.shtml (дата обращения 10.12.15)

Волощенко Вадим Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru Тел. 8(8634)371794, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, к.т.н., доцент.

Волощенко Петр Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: petrvoloshchenko@mail.ru, Тел. 8(8634)371794, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, к.т.н., доцент.

Voloshchenko Vadim Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of radio-engineering systems and management, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru phone: 8(8634)371794, the Department of engineering drawing and computer design, Cand.Sc., Lecturer.

Voloshchenko Peter Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of radio-engineering systems and management, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia. E-mail: petrvoloshchenko@mail.ru, phone: 8(8634)371794, the Department of engineering drawing and computer design, Cand.Sc., Lecturer.Y.Cand.Sc.,

УДК 534.143, 534.222.2

Е.В. Волощенко, А.П. Волощенко,
В.Ю. Волощенко

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛНОГРАФ

Предложено расширить диапазон измерения параметров морского волнения гидроакустическим волнографом за счет осуществления приема и обработки эхосигналов с «новыми» частотами, формирующимися в результате как самовоздействия, так и самодемодуляции мощного импульсного сигнала накачки при распространении в водной среде. Рассмотрена структурная схема и

физические принципы функционирования эхо-импульсной локационной системы, применение которой в рамках многопозиционной системы гидроакустического наблюдения позволит дистанционно получать данные о состоянии как водного объема, так и границы раздела «вода-воздух» прибрежного шельфа.

Ключевые слова: *акустический волнограф, нелинейная акустика.*

The extension of operating frequency band for metering wave's characteristics of sea's sinuous surface by means of reception and processing of the "new" sounding echo-signals such as high (self-action) and low (self-demodulation) harmonic components , which are generated by the finite amplitude impulse pump wave's propagation in nonlinear water medium. The structural scheme of echo pulse acoustic locating system, which can be used in the multiposition hydroacoustic monitoring surveillance system for remote viewing on both the state of the water volume and the water-air interface at different points of the coastal shelf, is presented.

Key words: *the underwater acoustic wavegraph, the nonlinear acoustics.*

Ветровое воздействие на водную поверхность заключается в том, что он создает на ее поверхности давление в направлении своего движения, причем, комбинация поверхностного натяжения и гравитационных сил создает капиллярно-гравитационные волны, для которых соотношение частоты и длины волны в «глубокой» воде (глубина $Д$ больше половины длины λ поверхностной волны) описываются следующим выражением [1]

$$\Theta^2 = k \times g + \alpha \times k^3 / \rho ,$$

где $\Theta = 2\pi f$ – угловая частота (рад/с), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, f – частота (Гц), λ – длина волны (м), g – ускорение силы тяжести

(9,8 м/с^2), α – поверхностное натяжение, ρ – плотность воды (кг/м^3). При малых длинах волн (больших k) в соотношении доминирует второй член и с учетом, что $k = \Theta/c$, получается соотношение для капиллярных волн $\Theta^2 = \alpha \times k^3 / \rho$ или $c^2 = \alpha \times k / \rho$, т.е. фазовая скорость капиллярных волн возрастает с уменьшением длины волны. Скорость гравитационных волн возрастает с увеличением длины волны в соответствии с выражением $\Theta^2 = k \times g$ или $c^2 = g/k$, например, для гравитационных волн при длинах 1 м и 100 м фазовые скорости составляют около 1 м/с и 10 м/с соответственно [1].

В докладе рассмотрены устройства, использующие акустический способ измерения параметров морского волнения, в котором используется эхо-метод при облучении со стороны дна короткими импульсами ультразвуковых волн по направлению нормали к границе раздела «вода-воздух». Результаты испытаний акустического волнографа рассмотрены в [2]: при используемой частоте 1,16 МГц (длина волны 0,13 см) ширина по уровню 0,7 основного лепестка характеристики направленности (ХН) электроакустического преобразователя (ЭАП) волнографа составляет 1,53^o при уровне бокового поля до 20 %, что обеспечит «пятно засветки» ультразвуком диаметром 1,4 м на границе раздела «вода-воздух» при излучении с глубины 50 метров и среднюю ошибку высоты волн до 0,1 м. Прибор Wave sonar фирмы ASL Environmental Sciences [3] содержит герметичный цилиндрический корпус с установленным на его крышке ЭАП, которой излучает в воду в направлении нормали к границе раздела «вода-воздух» короткие импульсы ультразвуковых сигналов с частотой заполнения 420 кГц. ЭАП имеет угловой раствор $\theta_{0,7} = 1{,}8^o$ по уровню (–3 дБ) основного лепестка ХН, что позволяет обеспечить на поверхности моря диаметр «пятна облучения» – 0,9 м, 3,1 м и 6,3 м для дистанций 30 м, 100 м и 200 м соответственно. Прибор устанавливается в составе притопленной буйковой станции на несущем буе с поплавками, заглубленном от поверхности воды на дистанцию до (225 ÷ 55) м и

закрепленном в необходимой точке подводного объема с помощью троса и донного якоря (заглубление до 2000 м).

Данные устройства имеют недостатки: 1) за счет большого размера облучаемого «пятна» возможно получение недостоверной информации при регистрации элементов поверхностного волнения; 2) нижняя граница аэрированного приповерхностного слоя при зондировании со стороны дна может быть воспринята как реальная поверхность моря. В данных условиях именно изменение длины волны λ зондирующего ультразвукового сигнала могло бы позволить изменять поперечное сечение объема ультразвуковой посылки за счет регулировки ширины основного лепестка ХН ЭАП, снижая до приемлемого уровня маскирующее действие объемной реверберационной помехи.

В предлагаемом волнографе предлагается использовать два нелинейных эффекта, возникающих в акустическом поле в области распространения мощного импульсного зондирующего сигнала накачки с частотой f, которые приводят к перераспределению его энергии по частотному спектру как вверх (самовоздействие, т.е. генерация высших гармонических составляющих с частотами $2f, 3f, ...nf$, где $n = 1,2,3,....$ – порядковый номер гармоники), так и вниз (самодемодуляция, т.е. генерация низкочастотных спектральных составляющих с частотами $F_M = (2m-1)/2\tau_3$, где $m = 1,2,3, ...$ – порядковый номер максимума в спектре, зависимость амплитуд которых от времени t пропорциональна второй производной по времени от квадрата огибающей мощного импульса накачки и определяется выражением $\partial^2/\partial t^2 [f^2(t - x/c)]$, $f(t)$ – огибающая акустического импульса; x – пространственная координата; c – скорость звука, τ_3 – длительность излученного импульса) [4]. Акустический волнограф [5] (рис.1) содержит излучающий тракт – генератор 1, соединенный через последовательно включенные усилитель мощности 2 и коммутатор 3, с обратимым

электроакустическим преобразователем 4 многоэлементного приемоизлучающего донного антенного устройства 5 [6].

Акустическая ось электроакустического преобразователя 4 расположена вертикально, т.е. облучение короткими ультразвуковыми импульсами взволнованной границы 7 раздела сред «вода – воздух» осуществляется по кратчайшему расстоянию через нелинейную водную среду 6, причем, эхосигналы принимаются тем же электроакустическим преобразователем 4 в течение паузы между последовательными импульсами излучения. В приемном тракте волнографа электроакустический преобразователь 4 соединен через коммутатор 3 со входами $[(n-1)+m]$ параллельно включенных цепочек (где $n=1,2,3\ldots i$, и $m=1,2,3\ldots j$, – целые числа) из последовательно соединенных резонансных усилителей 8, настроенных на различные спектральные составляющие, амплитудных детекторов 9 и аттенюаторов 10 с регулируемыми коэффициентами передачи. Выходы каждой цепочки соединены с соответствующими сигнальными $(n+m)$ – входами перемножителя 11.

Выход перемножителя 11 через пороговое устройство 12 и счетчик импульсов 13 соединен с входом запоминающего регистра 14 ЭЦВМ, который также соединен как с входом цифрового табло 15, так и через цифроаналоговый преобразователь 16 с входами самописца 17 и интегратора 18. Два других входа счетчика импульсов 13 соединены с выходами как тактового генератора 19, так и блока управления 20, причем, другие дополнительные выходы последнего соединены с управляющими входами генератора 1, резонансных усилителей 8 и аттенюаторов 10.

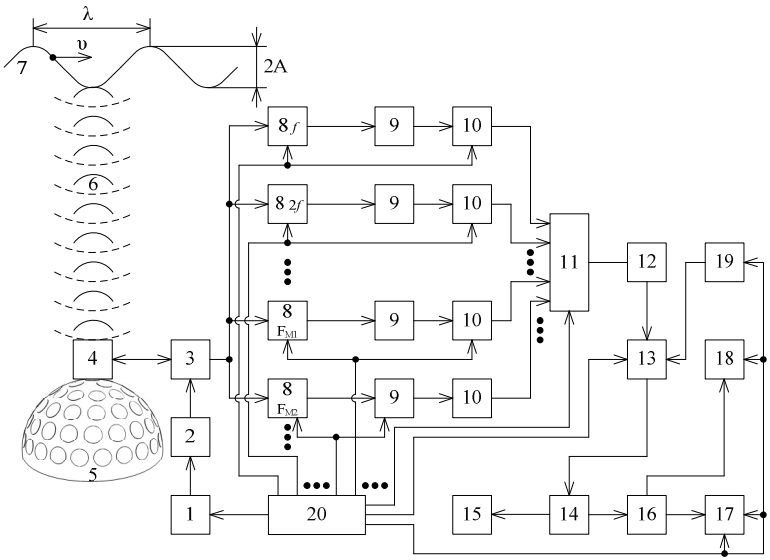


Рисунок 1 – Структурная схема акустического волнографа [5]

Учитывая, что принцип действия волнографа аналогичен принципу действия «обращенного» эхолота, то в качестве примера применения гидроакустической аппаратуры для получения первичных данных о подводной обстановке на нескольких частотах одновременно может быть рассмотрен двухчастотный навигационно-рыбопоисковый эхолот «Сарган». В [7] предложен вариант модернизации существующих судовых технических средств поиска, в частности, и рыбопоисковой аппаратуры «Сарган», который позволяет без переделок НЧ и ВЧ трактов излучения и с небольшими изменениями в приемных трактах перевести изделие в пятичастотный навигационно-рыбопоисковый эхолот и перекрыть диапазон сигналов промысловой гидроакустики (20 кГц -300 кГц) при возможности изменения практически в 10 раз ширины главного максимума и обнаружении одиночной рыбы/рыбного скопления на глубинах до (500 ÷2000) м.

Библиографический список

1. Греков А.Н., Васильев Д.М., Котов М.Н. Акустический измеритель параметров волн // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2006. – С. 51 –56.

2. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография: Основы и применения. – Пер. с англ. Под ред. Ю.Ю. Житковского. – М.: Мир,1980.–580с.

3.Мюир Т.Дж. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков//Акустика морских осадков/ Пер. с англ.; Под ред. Ю. Ю. Житковского. – М.: Мир, 1977. – с. 227 – 273.

3. V.Y.Voloshchenko, E.V.Voloshchenko THE PARAMETRIC ECHO-PULSE SONAR**.** Abstracts and Schedule of the 2015 International Conference PHENMA 2015, I.A. Parinov, S.-H. Chang (Eds). Southern Federal University Press: Rostov-on-Don, 2015, P.263 – 264.

4. Пат. № 104732 РФ G01S 15/00 Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство / Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. (РФ), ФГОУ ВПО «Южный Федеральный Университет» (РФ). Заявл. 03.12.2010г.; Опубл. 20.05.2011, Бюл №14 – 4 с.

5. www.aslenv.com.; Fissel D.B. et al. Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application. In Proc. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3-6 May 1999.

6. Волощенко В.Ю. Рыбопоисковая аппаратура на основе нелинейного эффекта самовоздействия: перспективы модернизации LAP LAMBERT Acad. Publ. KG, Saarbrucken, Germany,https://www.ljubljuknigi.ru/store/ru/book/isbn/978-3-659-11100-6)), 2012 г., 107с.

Волощенко Вадим Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических

систем и управления (ИРТСиУ), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru Тел. 8(8634)371794, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, к.т.н., доцент.

Волощенко Александр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: vigcorp@mail.ru Тел.: 8(8634)371795, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, ассистент.

Волощенко Елизавета Вадимовна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru Тел.: 8(8634)371794, кафедра информационных измерительных технологий и систем, студент 2-го курса.

Voloshchenko Vadim Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of radio-engineering systems and management, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru phone: 8(8634)371794, the Department of engineering drawing and computer design, Cand.Sc., Lecturer.

Voloshchenko Alexander P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928, Russia. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru phone: 8(8634)371794, the Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, Assistant.

Voloshchenko Elizaveta V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal

University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928, Russia. E-mail: voloshchenko.liza@mail.ru phone: 8(8634)371794, the Department of Informative Measuring Technologies and Systems, student.

УДК 534.222.2

А.В. Воронин, В.А. Воронин, К.К. Дегтеренко

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

В статье рассматриваются вопросы нелинейного взаимодействия акустических волн в воздушной среде в процессе распространения. Показывается, что коэффициент нелинейности в воздушной среде значительно превышает таковой в воде, поэтому генерация вторичных волн в воздушной среде эффективнее, чем в воде. Рассчитываются основные характеристики взаимодействия.

Ключевые слова: *параметрическая антенна, воздушная среда, преобразователь накачки, воздушный поток, волновое уравнение.*

In article questions of nonlinear interaction of acoustic waves in the air environment in the course of distribution are considered. Is shown that the nonlinearity coefficient in the air environment considerably exceeds that in water therefore generation of secondary waves in the air environment is more effective than in water. The main characteristics of interaction calculate.

Key words: *parametrical array, air environment, pump transducer, air stream, wave equation.*

Нелинейное взаимодействие акустических волн в воздушной среде имеет некоторые особенности, обусловленные такими свойствами как большие соотношения скоростей потоков и скорости

распространения звуковых волн, существенные изменения параметров от температуры и др.

В настоящее время получили широкое распространение акустические приборы для исследования атмосферы с целью определения различных ее параметров [1]. Результаты исследования существенно зависят от существующих условий распространения звука в атмосфере [2] и от параметров излучающих систем. Причина различий результатов исследований заключается в высокой чувствительности распространяющегося звукового излучения в атмосфере к таким параметрам, как скорость и направление ветра, температура, влажность, атмосферное давление и их изменения по трассе распространения волн [3].

В монографиях [4, 5] рассмотрены вопросы взаимодействия акустических волн в канале распространения, построения излучающих параметрических антенн, их характеристики и сферы применения в гидроакустике.

Взаимодействие акустических волн в канале распространения можно рассмотреть, используя неоднородное волновое уравнение [4, 5]

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0}\frac{\partial^2 \left(P_0^2\right)}{\partial t^2}, \qquad (1)$$

где ε – нелинейный параметр; P – звуковое давление; z – координата вдоль распространения волны; P_0 – звуковое давление волн накачки; c_0 и ρ_0 – скорость звука и плотность среды.

Сравним, как различаются коэффициенты нелинейности для воздушной среды и водной среды при равных значениях амплитуд волн накачки. Для сравнения примем скорости звука в воде и воздухе равными 1500 и 340 м/с, а плотность 1000 и 1,29 кг/м^3. Нелинейный параметр для воды $\varepsilon = 3{,}5$, а для воздуха $\varepsilon = 1{,}2$.

В результате для воды этот коэффициент приблизительно равен $6{,}9 \cdot 10^{-13}$, а для воздуха – $6{,}9 \cdot 10^{-8}$. Следовательно, генерация

вторичных волн в воздухе в точке происходит значительно эффективнее, чем в воде.

Для реализации параметрической антенны в воздушной среде выберем в качестве преобразователей для антенны накачки высокочастотные громкоговорители Hertz ST 25, собранные в антенну накачки. Такие громкоговорители имеют следующие характеристики: чувствительность в режиме излучения 107 дБ / 2,83 В/м, пиковая мощность 100 Вт. Номинальное сопротивление 4 Ом, диапазон частот 3000 – 20000 Гц, диаметр корпуса 43,5 мм, диаметр излучающей поверхности 25 мм. Расчет характеристик параметрической антенны с такими преобразователями необходимо вести из расчета, что интенсивность излучения с поверхности антенны будет меньше из-за распределения ее между излучающими поверхностями преобразователей и не активной части поверхности антенны. При выборе частот накачки в диапазоне 18 – 20 кГц и ширине пучка 3 градуса диаметр антенны накачки составит не более 35 см.

При взаимодействии волн в воздушной среде с аэродинамическим потоком особенностью является большее соотношение скорости потока и скорости распространения акустических волн и гораздо большее затухание, как волн накачки, так и волн разностной частоты. Рассмотрим характеристики поля параметрической антенны в воздушной среде.

Для анализа процесса нелинейного взаимодействия можно воспользоваться неоднородным волновым уравнением, в котором правая часть описывает нелинейное взаимодействие волн в виде суммы взаимодействий в стационарной среде и в среде с воздушными потоками.

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0}\frac{\partial^2 \left(P_0^2\right)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} U \nabla \frac{\partial \left(P_0^2\right)}{\partial t}, \qquad (2)$$

В выражении (2) приняты следующие обозначения: **U** – скорость потока, ось которого расположена под углом к направлению

распространения акустических волн; $\left(\frac{\partial}{\partial t}+(U,\nabla)\right)$ – конвективная производная.

Решение для генерируемого поля представить в виде суммы двух составляющих

$$P = P_1 + P_2 \ , \tag{3}$$

где P_1 – низкочастотное поле, генерируемое волнами накачки в однородной среде, а P_2 – добавка к низкочастотному полю за счет влияния движения среды.

Эти два эффекта, за счет которых появляются источники, являются эффектами одного порядка малости – второго, и, следовательно, их можно представить аддитивными.

Для решения задачи взаимодействия волн с учетом дифракционных и диссипативных эффектов будем использовать уравнение Хохлова-Заболоцкой-Кузнецова (ХЗК), которое описывает взаимодействие волн в ограниченных звуковых пучках в рамках квазиоптического приближения. Заметим, что квазиоптическое приближение не рассматривает рассеяние первичных волн на неоднородностях среды [4,5].

$$\begin{aligned} &\Delta P - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2\rho_0}\frac{\partial}{\partial t}\Delta_\perp P = \\ &-\frac{\varepsilon}{c_0^4\rho_0}\frac{\partial^2\left(P_0^2\right)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4\rho_0}\left(U\nabla\frac{\partial(P_0^2)}{\partial t}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

Запишем уравнения для P_1 и P_2 как

$$\Delta P_1 - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2\rho_0}\frac{\partial}{\partial t}\Delta_\perp P_1 = -\frac{\varepsilon}{c_0^4\rho_0}\frac{\partial^2\left(P_0^2\right)}{\partial t^2} \tag{5}$$

$$\Delta P_2 - \frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0}\frac{\partial}{\partial t}\Delta_\perp P_2 = -\frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0}\left(\vec{U}, \nabla \frac{\partial\left(P_0^2\right)}{\partial t}\right). \qquad (6)$$

Решение уравнения (3) для взаимодействия волн в среде без потока получено в виде [4,5].

Уравнение (4) описывает звуковое поле, возникающее благодаря потоку. Поскольку правые части уравнений (5) и (6) имеют один и тот же порядок малости и одинаковую физическую интерпретацию, их решение ведется также методом последовательных приближений.

Анализируя эти выражения, можно отметить, что и радиальная, и осевая составляющая скорости потока вносит добавку в генерируемую волну. Однако даже ортогональный ламинарный поток влияет на эффективность процесса генерации волн, а такие потоки часто встречаются на практике при использовании параметрических антенн на движущихся носителях.

Исследования, проведенные методом численного моделирования, показывают, что эффективность процесса нелинейного взаимодействия в среде с потоком увеличивается. Следует ожидать, что неоднородности в виде потоков не окажут существенного влияния на характеристику направленности параметрической антенны, так как не изменяется длина зоны взаимодействия волн накачки.

Таким образом, наличие неоднородностей в среде ведет к изменению параметров среды и параметров процесса нелинейного взаимодействия волн накачки с акустическими полями и полями другой природы (пример – взаимодействие волн в однородной среде и среде с потоком воздуха). Разработанный единый подход к решению задачи нелинейного взаимодействия позволяет получить необходимые для анализа зависимости в каждом конкретном случае. Применение такого подхода приводит как к результатам, полученным другими методами, так и к оригинальным решениям, как в случае с воздушным потоком.

Библиографический список

1. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D. Low-level jets in the Moscow region in summer and winter o,serve3d with a sodar network. - bound.-Layer Meteor. 143, 2012, p. 159 – 175.

2. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 2 (28). С. 86 –94.

3. Красненко Н.П. Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы. Методы и устройства передачи и обработки информации. 2009. № 11. С. 143 –154.

4. В.А.Воронин, В.П. Кузнецов, Б.Г.Мордвинов, С.П.Тарасов, В.И. Тимошенко. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростиздат. Ростов-на-Дону. 2007. – 448 с.

5. В.А. Воронин, С.П.Тарасов, В.И. Тимошенко. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.

Воронин Василий Алексcевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Воронин Артем Васильевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; ассистент.

Дегтеренко Кирилл Константинович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; Институт

нанотехнологий, электроники и приборостроения; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Voronin Vasily A. – Federal public autonomous educational institution of higher education "Southern federal university"; Institute of nanotechnologies, electronics and instrument making; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44; ph.: 88634371795; the departament of electrohydroacoustic and medical engineering; Dr. of eng. Sc.; professor.

Voronin Artem V. – Federal public autonomous educational institution of higher education "Southern federal university"; Institute of nanotechnologies, electronics and instrument making; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44; ph.: 88634371795; the departament of electrohydroacoustic and medical engineering; assistant.

Degterenko Kirill K. – Federal public autonomous educational institution of higher education "Southern federal university"; Institute of nanotechnologies, electronics and instrument making; e-mail: vva-47@mail.ru; 347928, Taganrog, Nekrasovsky Lane, 44; ph.: 88634371795; the departament of electrohydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

УДК 534.25:551.594.25

В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернов, М.А. Лупандина

СПОСОБ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ОСАЖДАЕМЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ НАНОАЭРОЗОЛЕЙ В МОЩНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

Рассмотрены физические процессы интенсифицирующего действия мощных акустических колебаний при акустическом оседании наноразмерных и микронных аэрозолей. Оценено взаимное

влияние гидродинамических полей обтекания тонкодисперсных частиц промышленных аэрозолей на процесс осаждения. Дано объяснение ускоренной диффузией частиц в звуковом поле. Приведены экспериментальные подтверждения результатов математического моделирования.

Ключевые слова: *осаждение дымов, аэрозольные частицы, пограничные слои, диффузия.*

There are shown a mutual effect of hydrodynamic flow fields of industrial aerosols of fine particles in the acoustic field which lead to their intensive coagulation. Getting into the zone of strong interaction due to rapid diffusion of particles in the sound field. Intensify of the acoustic action for the deposition of nanoscale aerosolis is associated with an increase in the diffusion flux due to the appearance of a thin (compared with hydrodynamic) of the acoustic boundary layer.

Key words: *deposition of fumes, aerosol particles, boundary layers, diffusion.*

Большое число промышленных технологических процессов, таких как осаждение дымов, гальваника и электрохимия, сушка, эмульгирование, бактерицидная обработка резко ускоряются при наложении ультразвуковых колебаний различных диапазонов частот.

В работе представлены расчетные формулы для оценки относительного изменения осаждаемых диффузионных потоков нано- и субмикронных аэрозолей через гидродинамический и акустический пограничные слои соответственно/

Потоки нано- и субмикронных частиц аэрозолей через акустический пограничные слои описываются выражением (1) [1]:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{v_0(2\eta)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R(1+\frac{3}{16}\mathrm{Re})}\exp[-\frac{(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{v_0 h(2\eta)^{\frac{1}{2}}(1+\frac{3}{16}\mathrm{Re})6\pi\eta R}x] \qquad (1)$$

И соответственно в гидродинамическом потоке:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R}\exp[-\frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R}x]. \quad (2)$$

Экспоненциальные члены в формулах (1) и (2) можно переписать в виде exp(-$K_a x$) и exp(-$K_г x$), где $К_а$ и $К_г$ назовем соответственно коэффициентами акустического и гидродинамического осаждения нано- и субмикронных частиц [2]. Из (2) коэффициент акустического осаждения равен:

$$K_a = \frac{(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{v_0 h(2\eta)^{\frac{1}{2}}(1+\frac{3}{16}\mathrm{Re})6\pi\eta R}. \quad (3)$$

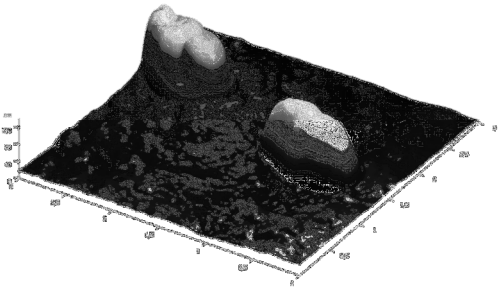
Из (2) коэффициент гидродинамического осаждения принимает вид:

$$K_2 = \frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(v_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R} \quad (4)$$

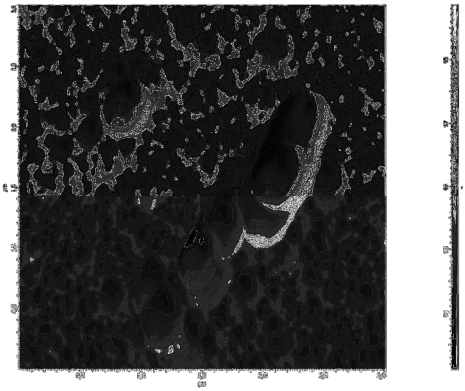
Экспериментально результаты теоретических исследований были подтверждены на специально созданной лабораторной установке с генерацией суб- и наноразмерных частиц дымов различных видов табака.

Размеры аэрозольных частицы дыма сигарет находятся в пределах от десятков нанометров до единиц микрон. Нами было исследовано дисперсное распределение аэрозольных частиц различных сортов табачных изделий. Методика взятия проб и использование наномикроскопа для исследования частиц сигаретного дыма опубликованы в статье [3].

Исследования наночастиц табачного дыма с помощью атомно-силовой микроскопии позволили установить первоначальную форму и дисперсный состав частичек. Было установлено, что частицы сигаретного дыма имеют округлую продолговатую форму, способны образовывать нитевидные агрегаты в статических условиях (рис. 1 а и б).



а) трехмерное изображение частиц табачного дыма



б) двумерное изображение частиц

Рисунок 1 – Изображения частиц табачного дыма, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии

Для расчета дисперсного состава использовались результаты исследований наночастиц сигаретного дыма, полученные в виде фотографий методом атомно-силовой микроскопии. По фотографиям были оценены размеры частиц и получено дисперсное распределение. На рис. 2 приведены микрофотографии частиц табачного дыма четырех исследованных марок табака.

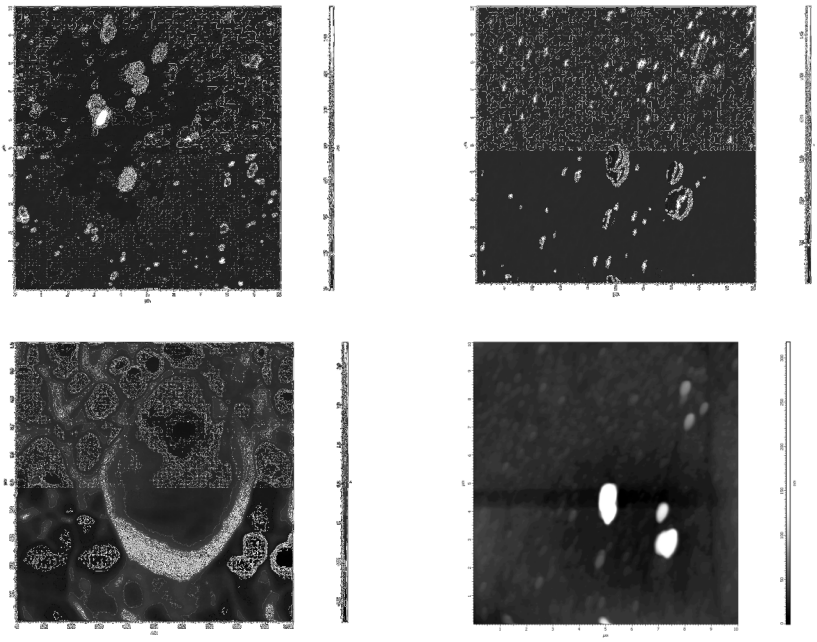


Рисунок 2 – Микрофотографии частиц табачного дыма четырех исследованных марок табака

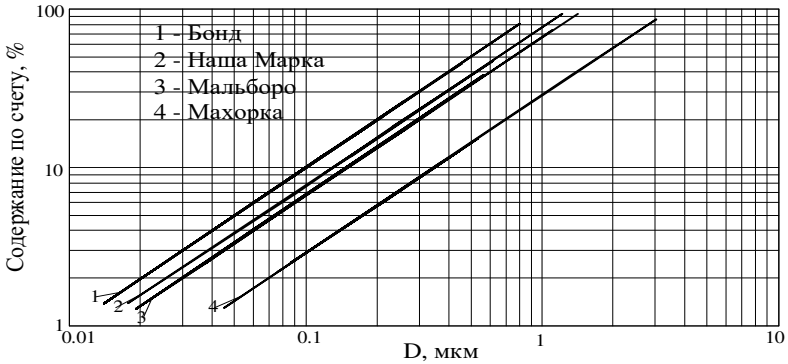


Рисунок 3 – Дисперсное распределение аэрозольных частиц табачного дыма

Размеры исследуемых частиц находятся в пределах порядка 0,01 – 10 мкм. Менее 10% от общего числа частиц составляют частицы размерами менее 100 мкм (рис. 3). Несмотря на то, что этих частиц меньшинство, они представляют особый интерес, т.к. они способны проникать в глубинные структуры поверхностей обработки [4].

Средний медианный размер частиц различных табаков лежит в пределах от Dm=0,5 мкм до Dm=1,8 мкм, что соответствует среднему медианному размеру частиц промышленных аэрозолей, наносимых на технические изделия.

Библиографический список

1. Чернов Н.Н., Тимошенко М.А. Исследование частиц сигаретного дыма// Таганрог, Известия ТРТУ. 2006, – № 12(67). – с.118 – 120
2. Тимошенко В.И., Чернов Н.Н. Взаимодействие и диффузия частиц в звуковом поле.-Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2003. – 304с.
3. М.А. Тимошенко, Н.Н. Чернов, П.С. Голосов. Экспериментальные результаты исследования и сравнение с теорией диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. №9(122) – с. 174 – 180.
4. М.А. Тимошенко. Диффузионный поток при осаждении наноаэрозолей в звуковом поле// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. №9 (122) – с. 206 – 211.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8

(8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Тимошенко Владимир Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Лупандина Мария Алексеевна – АМТИ, филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет» (КубГТУ). E-mail: ega@fep.tti.ru, ул. Московская, 2, Краснодар, Краснодарский край, преподаватель

Chernov Nikolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

Timoshenko Vladimir I. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

Lupandina Maria A – AMTI, branch of Federal state Autonomous educational institution of higher professional education "Kuban state technological University" (KubGTU). E-mail: ega@fep.tti.ru, street Moskovskaya, 2, Krasnodar, Krasnodar Krai, teacher.

УДК 53.072.13

Д.А. Давыдов, Э.В. Гончар, В.Ю. Нерук,
В.И. Тимошенко
Научный руководитель д.т.н., профессор кафедры
ЭГА и МТ В.И. Тимошенко

АЭРОТЕМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ЗВУКА В ТРУБЕ РИЙКЕ

Изучено явление аэротермического усиления звука в трубе Рийке. Модернизирован эксперимeтальный лабораторный стенд. Исследована зависимость положительной обратной связи от размеров отверстия.

Ключевые слова: *труба Рийке, усиление, нелинейная акустика.*

The phenomenon of aerothermal sound amplification in a Rijke tube. Upgraded the experimentally laboratory bench . The dependence of the positive feedback on the size of the hole.

Key words: *Rijke tube, amplification, nonlinear acoustics.*

Явление аэротермической генерации звука в трубе Рийке известно давно [1]. Оно изучается в лабораторном практикуме по курсу «Физические поля» на кафедре ЭГА и МТ. Целью нашего эксперимента является создание новой лабораторной работы по аэротемическому усилению звука в трубе Рийке. Как известно, автогенерация колебаний (как акустических, так и электромагнитных) это процесс усиления звука при определенном уровне положительной обратной связи. Уменьшение этой положительной обратной связи приводит к преобразованию генератора в усилитель. Явление усиления и зоны генерации в трубе Рийке исследовалось в начале 70х годов [2]. Мы поставили цель исследовать не только зоны генерации, но и пороговость, инерционность и гистерезис этого явления. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.

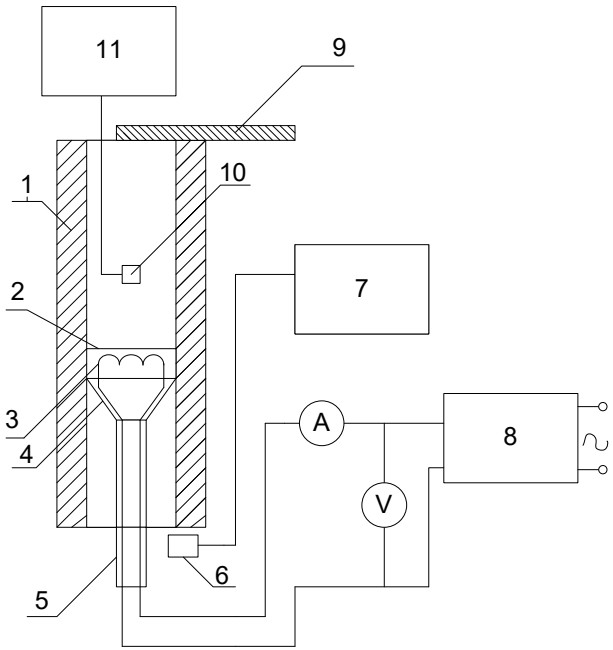


Рисунок 1 – Лабораторный стенд для изучения эффекта аэротермического усиления звука

1. Кварцевая труба.
2. Нагреватель.
3. Нихромовая спираль.
4. Центрирующая спираль.
5. Держатель.
6. Микрофон.
7. Осциллограф.
8. Генератор.
9. Крышка с заслонкой.
10. Излучатель.
11. Генератор.

Явление аэротермического усиления в трубе Рийке является типично нелинейным. Как и в большинстве нелинейных явлений, проявляется закономерность пороговости и гистерезиса. До

настоящего времени нам неизвестны работы по изучению этих факторов. Для изучения усиления в верхней части трубы сделана подвижная заслонка (на рис. 1 № 9), которая позволяет нормировано перекрывать конвекционный поток. Соответственно, интенсивность звука будет зависеть от размеров отверстия. Эксперимент: устанавливаем заслонку модернизированного лабораторного стенда на порог соответствующий минимальному звучанию в трубе Рийке (52–53 % от площади отверстия). Устанавливаем частоту 175 Гц и интенсивность 2 мкВ на излучателе (№ 10) с помощью генератора (№11). В трубе возникает усиление звука. При помощи селективного вольтметра фиксируем увеличение интенсивности звука с 2 мкВ до 7 мкВ. Вычисляем коэффициент усиления.

В результате эксперимента было выявлено, что на частоте 175 Гц, мощности 90 Вт – K_y=3,5.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о превращении тепловой энергии в акустические колебания в трубе. Под действием конвекционного потока воздуха за счет инерционности процесса теплопередачи от нагревателя звукового давления звуковое давление в средней части трубы получит больший импульс, когда колебательная скорость совпадает по направлению со скорость конвекционного потока и тем самым увеличит теплоотведение от нагревателя. В случае с противоположным направлением колебательной скорости акустическая волна будет препятствовать теплоотводу [3].

Библиографический список

1. Тимошенко В.И. «Исследование аэротермического усиления звука в трубах», Акустические исследования АНСССР, том XVII, выпуск 4, 1971.

2. Тимошенко В.И. «К вопросу возбуждения звука с использованием эффекта Рийке», труды ТРТИ, выпуск II, 1969.

3. Бородин Ю.И., Тимошенко В.И. «Об эффекте аэротермического усиления звука в трубах», труды ТРТИ, выпуск 25, Прикладная акустика, том IV, 1971.

Давыдов Даниил Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: d.davydov505@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Нерук Валерий Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: walerik1995@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Гончар Эдуард Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: edo.gonchar@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Davydov Daniil A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: d.davydov505@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

Neruk Valery Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: walerik1995@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

Gonchar Eduard V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: edo.gonchar@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

УДК 534.29

А.В. Данников, Н.Н. Чернов, В.В. Гривцов
Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОРПУСА КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В статье описана роль метода акустической эмиссии, его достоинства. Преимущество АЭ системы «Малахит АС-15А» и её технические характеристики.

Ключевые слова: *акустическая эмиссия, диагностика, неразрушающий контроль.*

The article describes the role of acoustic emission method, its advantages. The advantage of the AE system "Malachite AC-15A" and its technical characteristics

Key words: *acoustic emission, diagnosis, non-destructive testing.*

Важнейшая роль в повышении эффективности использования кораблей принадлежит технической эксплуатации. Она оказывает существенное влияние на все основные показатели работы флота, включая отдачу основных фондов, рентабельность и валютный доход.

Для комплексной оценки состояния элементов корпуса ледокола в процессе ходовых испытаний используют различные виды неразрушающего контроля, в частности, акустическая эмиссия (АЭ). Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля в двух ключевых аспектах. Во-первых, источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, то есть метод является пассивным, а не активным, как большинство других методов контроля. Во-вторых, в отличие от других методов АЭ обнаруживает движение дефекта, а не статические неоднородности, связанные с наличием дефектов, то есть АЭ обнаруживает развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов. Акустико-эмиссионная аппаратура обычно принимает сигналы АЭ в частотном диапазоне от 20 кГц до 1200 кГц. Процессы типа ударов, трения, течей являются источниками нежелательных шумов препятствующих приёму сигналов АЭ. Для ледоколов это также акустические шумы трения корпуса ледокола о лёд, а также шумы разлома ледовых массивов [1].

Предложено много различных технических решений с целью снижения и избавления от этих шумовых помех, так как шумы являются основной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Важной задачей является их исследование и по возможности устранение с целью повышения чувствительности метода.

Определение координат источника АЭ является важной частью метода. Это особенно важно при контроле крупногабаритных объектов. Существует несколько основных методов определения координат источников АЭ. Прежде всего, это зонная локация, при

которой источники относят к сравнительно большим по площади зонам. Второй способ – точечная локация, при которой координаты источника рассчитываются достаточно точно с помощью разностей времен прихода сигналов на различные датчики, объединенные в антенну. При расчетах в формулу локации в качестве параметра вводится скорость распространения волны. Достигаемая в расчетах точность контролируется этим параметром, который в свою очередь зависит от геометрии и толщины объекта, а также свойств вещества, наполняющего объект контроля [3].

В процессе эксплуатации судна его корпус, а также все остальные узлы претерпевают значительные знакопеременные нагрузки, что способствует накоплению в них усталостных микротрещин. Контроль появления и роста микротрещин возможен путём использования метода АЭ.

АЭ оборудование варьируется в широких пределах по форме, по функциональному назначению. Некоторые типы оборудования разрабатываются с целью функционирования в автоматическом режиме в производственном цикле работы. Система «Малахит АС-15А» позволяет избежать операций регулировки коэффициентов усиления в каналах в процессе испытаний и перед ними, так как регистрация сигналов осуществляется во всем диапазоне изменения амплитуд. Это позволяет применять помимо фиксированных, плавающие пороговые уровни, автоматически улавливающие изменения среднего значения сигнала [2].

Таблица 1.

Основные технические характеристики системы

Число независимых каналов	от 1 до 112
Стандартный частотный диапазон	10-300 кГц
Напряжение шума, приведенное ко входу (режим к.з.)	3 мкВ эфф.

Измеряемые параметры	время прихода импульса акустической эмиссии (305 час., дискретность 1 мкс) время нарастания до пика, до максимума (0-60000 мкс) длительность (0-60000 мкс) амплитуда пика, амплитуда максимума (80 дБ, дискретность 0,5 дБ) число осцилляций до пика, до максимума, всего сигнала (0-65535) средняя частота до пика, до максимума, всего сигнала (0-500 кГц) среднее значение сигнала (80 дБ)
Интервал контроля самоблокирования (ИКС), с (с дискретностью 65535 мкс)	1000
Пиковая скорость регистрации сигналов в каналах	5000 сигн/сек
Параметрический вход, ФНЧ - 10 Гц, 3 диапазона	±10 В, ±1 В, ±100 мВ, токовая петля 20 мА
Габариты и масса системных блоков: 8-канального и 16-канального	240 x 375 x 147 мм, 7 кг 450 x 375 x 147 мм, 12 кг
Электропитание (8 каналов)	220 В (30 Вт), или постоянный ток 12-15 В, (1 А)

Библиографический список

1. Нормативный документ Госгортехнадзора России РД 03-300-99 «Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов».

2. Патент RU123531 «Преобразователь акустической эмиссии», МПК G01N29/04. Заявка 2012128151/28 от 03.07.2012. Опубликовано: 27.12.2012. Патентообладатель: Разуваев И.В. Автор: Разуваев И. В.

3. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Данников Артем Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: dav.91@list.ru; г.Таганрог, ул. Р.Люксембург, 99, кв.14, магистрант 2-го курса кафедры ЭГА и МТ

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н., профессор.

Гривцов Владимир Владиславович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра Инженерной графики и компьютерного дизайна, к.т.н., доцент.

Dannikov Artem V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: Dav.91@list.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student of 2-nd course.

Chernov Nikolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

Grivtsov Vladimir V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of radio-engineering systems and management; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Engineering graphics and computer design, associate professor.

УДК 534.7

А.С. Жардецкая, Н.Н. Чернов
Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ КРОВОТОКА

Ультразвуковая допплерография для определения состояния сосудов и близлежащих тканей является распространенным методом диагностики. Однако в обычной допплерографии большая потеря информации. Для улучшения разрешения, контрастности и

минимизации потерь информации предлагается использовать широкополосные сигналы.

Ключевые слова: *ультразвуковая диагностика, перспективы развития, новые технологии, широкополосный сигнал.*

Doppler ultrasound to determine the condition of the vessels and the surrounding tissue is a common method of diagnosis . However, in the conventional Doppler great loss of information. To improve the resolution , contrast, and minimizing the loss of information is offered to use broadband signals .

Key words: *diagnostic ultrasound, prospects of development, new technologies, wideband signal.*

Доплерография – это метод ультразвуковой диагностики сердечно-сосудистой системы (ССС), основанный на эффекте Доплера: изменение частоты ультразвуковых волн, отраженных от эритроцитов движущейся крови. Доплеровский сдвиг частоты позволяет судить о скорости и направлении кровотока. В результате передачи серии ультразвуковых импульсов в ткани на экране монитора получают график, демонстрирующий изменение скорости кровотока с течением времени на заданной глубине (доплеровский спектр или частотный спектр эхо-сигналов, поступающих от кровотока) [2].

Такой спектральный (или импульсный) режим позволяет на основе оценки кровотока вычислить ряд важных параметров таких, как проходимость сосудов и их состояние.

Ультразвуковая доплерография, позволяющая проводить наблюдения в режиме реального времени, является неинвазивным и безопасным методом исследования параметров циркуляции крови и состояния сосудов. Преимущество ультразвуковой доплерографии в том, что она позволяет получить результат безболезненно и без побочных эффектов для пациента, без лучевой нагрузки и

практически без прямых противопоказаний. Его можно применять и для детей [4].

Доплерография исследует также скорость сокращения сердечной мышцы и движения сердечных клапанов. В отличие от ангиографии, метод совершенно безвреден, поскольку не нуждается во введении контрастных веществ.

Преимущества доплерографии особенно очевидны в акушерской практике. Метод позволяет изучать состояние кровотока плода, маточных артерий и пуповины, а также регистрировать частоту сердечных сокращений (ЧСС) плода [3].

Дуплексное сканирование широко используется в сосудистой хирургии.

Метод способствует ранней диагностике заболеваний и предупреждению развития осложнений. Может выполняться повторно неоднократно, что может быть необходимо для оценки динамики заболевания на фоне терапии.

В обычной жизни мы привыкли сталкиваться с обычной доплерографией, где сигнал одной частоты посылается вглубь тканей человека, а потом выделяется гармоническая составляющая колебаний внутренних органов, вызванных прохождением сквозь тело базового ультразвукового импульса. В этих случаях полезным сигналом является сигнал, полученный при вычитании базового из отраженного. Вторая гармоника целесообразна, если ткани активно поглощают первую гармонику.

Но сейчас основной ветвью развития ультразвуковых исследований является использование широкополосных сигналов [1]. Доплерография не исключение. Сигналы, у которых верхняя граница полосы частот более чем в 2 раза превышает нижнюю границу, называют широкополосными [5]. Основным преимуществом широкополосных датчиков является то, что в ответ на излученный широкополосный сигнал получают широкую полосу гармоник, что обеспечивает сбор отраженных сигналов и возможность их оптимизации.

Благодаря этому можно улучшить разрешающую способность ультразвуковой системы, повысить контраст, минимизировать потери информации. На основе этого можно получить более полную информации о кровотоке и состоянии сосудов. Сигналы данного типа могут проникать на довольно большую величину для столь высоких частот (5-8 МГц), а, следовательно, можно обследовать близлежащие к сосудам ткани.

Обычно используются импульсы с линейно-частотной модуляцией, которые представляют собой сигналы, внутри которых частота меняется по линейному закону либо возрастая, либо убывая, потому что они более легкие в обработке и использовании, но при этом не теряют свою информативность.

$A(t) = A_0(T)\sin 2\pi f_0 \pm \pi\alpha t^2)$, $A_0(T)$ – огибающая ЛЧМ импульса, описываемая колоколом Гаусса, f_0 – начальная частота колебаний (в начале импульса), α – скорость перестройки частоты[6].

Применение широкополосных сигналов в ультразвуковой доплерографии позволяет расширить возможности и уменьшить негативное воздействие ультразвуковых сигналов на исследуемые органы и ткани.

Библиографический список

1. О.Ю.Атьков Основные тенденции развития ультразвуковых методов диагностики// Визуализация в клинике - Июнь,2002 г -N20.
2. А.Холин, Е.Бондарева Допплерография и дуплексное сканирование сосудов головного мозга - 2009 г.
3. Ю.А.Росин Допплерография сосудов головного мозга у детей – Июнь,2007 г.
4. С.Э.Лелюк, В.Г.Лелюк Основные принципы дуплексного сканирования магистральных артерий - 1995 г.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — 3-е изд. — М.: «Высшая школа», 2000. — 462 с.
6. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — 5-е изд. — М.: Дрофа, 2006. — 719 с.

Жардецкая Анастасия Сергеевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), e-mail: naya.fox@mail.ru, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 4-го курса.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Zhardetskaya Anastasia S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: naya.fox@mail.ru 347928 , Taganrog, per. Nekrasovsky , 44 , tel . 8 (8634) 37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 4-th course.

Chernov Nicolay N. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 620.179.16

А. Н. Иванов, В. И. Тимошенко

ВОПРОСЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

В данной статье рассмотрены особенности и оптимизация импульсного эхо-метода контроля бесшовных труб продольного сканирования сдвиговыми волнами, обеспечивающего возможность определения местоположения дефекта. Приведены графики зависимости углов продольной и сдвиговой волны, а также коэффициенты отражения и преломления по энергии в зависимости от падения продольной ультразвуковой волны под углом из жидкости на границу раздела с твёрдым телом для системы вода-сталь. Показано прохождение ультразвуковых колебаний в трубе с большим углом ввода.

Ключевые слова: *Ультразвуковой контроль труб, выбор метода контроля, углы ввода ультразвуковых колебаний.*

In given article features and optimisation of a pulse echo-quality monitoring of seamless pipes of longitudinal scanning by the cross-section waves, providing possibility of definition of a site of defect are considered. Schedules of dependence of corners of a longitudinal and shift wave, and also factors of reflexion and refraction on energy depending on falling of a longitudinal ultrasonic wave under a corner from a liquid on border of section with a firm body for system water-steel are resulted. Passage of ultrasonic fluctuations to a pipe with the big corner of input is shown.

Key words: *The ultrasonic control of pipes, quality monitoring choice, corners of input of ultrasonic fluctuations.*

В ультразвуковой дефектоскопии изделий металлургического производства, в том числе и бесшовных труб, наиболее широкое распространение получил импульсный эхо-метод контроля,

обеспечивающий высокую чувствительность, разрешающую способность, возможность определения местоположения дефекта. При контроле труб выбор типа волн зависит от отношения толщины стенки (T) к наружному диаметру (*D*).

При T/D > 0,2 целесообразно использовать для контроля продольные волны, при меньших значениях (T/D=0,02–0,2) более эффективные результаты контроля получаются при использовании сдвиговых волн, что связано с разрешающей способностью.

По техническому заданию на ОАО «ТАГМЕТ» контролю подлежат трубы с наружным диаметром от 73 до 273 мм. с толщиной стенки от 5 до 70 мм. Отношение *T/D* для этих труб лежит в пределах 0,02-0,4, отсюда, целесообразно применить для контроля иммерсионный импульсный эхо-метод с использованием сдвиговых волн.

При падении на поверхность твёрдого тела ультразвуковой волны под углом, отличным от нормального, в твёрдом теле распространяются преломленная продольная волна и сдвиговая волна, появившиеся в результате трансформации волны на границе раздела [1].

На рис. 1 приведён случай падения продольной ультразвуковой волны *Uпад* под углом *α* из жидкости на границу раздела с твёрдым телом.

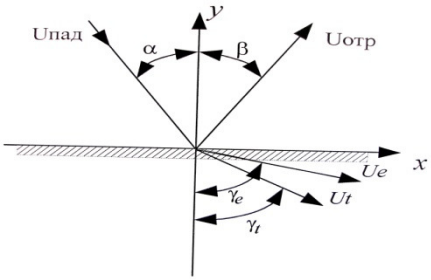


Рисунок 1 – Схема падающей продольной волны на границу раздела вода-сталь

В жидкости появляется отражённая волна *Uотр.* под углом $\beta=\alpha$. В металле распространяется продольная волна *Ue* с углом γe и сдвиговая волна *Ut* с углом γt. Угол ввода ультразвуковой волны в металле связан с углом падения законом Снеллиуса:

$$\frac{Cm}{\sin\alpha} = \frac{Cm}{\sin\beta} = \frac{Ce}{\sin\gamma e} = \frac{Ct}{\sin\gamma t},$$

где Cm – скорость распространения звука в жидкости;

Ce – скорость распространения продольных волн в металле;

Ct – скорость распространения сдвиговых волн в металле.

При sinα1 = Cm/Ce, γe = 90º, т.е. происходит полное внутреннее отражение продольной волны, и в металле распространяется только сдвиговая (поперечная) волна.

При sinα2 = Cm/Ct, γt = 90º, т.е. происходит полное внутреннее отражение поперечной волны, и в металле распространяется только поверхностная волна.

Следовательно, для возбуждения сдвиговой волны в металле угол падения ультразвуковой волны из жидкости (α) должен лежать в пределах: α1<α<α2, где α1 первый критический угол, α2 второй критический угол.

Для случая падения ультразвуковой волны из воды в металл: 14,7º<α<26,7º.

Для обеспечения максимальной амплитуды сдвиговых колебаний в металле необходимо воспользоваться приводимыми коэффициентами отражения и преломления по энергии [2]:

$$R = \left(\frac{Ze\cos^2 2\gamma t + Zt\sin^2 2\gamma t - Zm}{Ze\cos^2 2\gamma t + Zt\sin^2 2\gamma t + Zm}\right)^2;$$

$$De = \frac{2ZeZm\cos^2 2\gamma t}{\left(Ze\cos^2 2\gamma t + Zt\sin^2 2\gamma t + Zm\right)^2};$$

$$Dt = \frac{4ZtZm\sin^2 2\gamma t}{\left(Ze\cos^2 2\gamma t + Zt\sin^2 2\gamma t + Zm\right)^2},$$

где R – коэффициент отражения по энергии; De и Dt коэффициент преломления по энергии, соответственно для продольной и поперечной волн; Ze, Zt, Zm – акустическое сопротивление среды; Z=ρc, где ρ – плотность материала c – скорость распространения звука в материале; Z – акустическое сопротивление материала, в который происходит излучение.

Из графика на рис. 2 видно, что оптимальный угол ввода сдвиговой волны в металле для обеспечения максимальной ультразвуковой энергии γt=35 –60º.

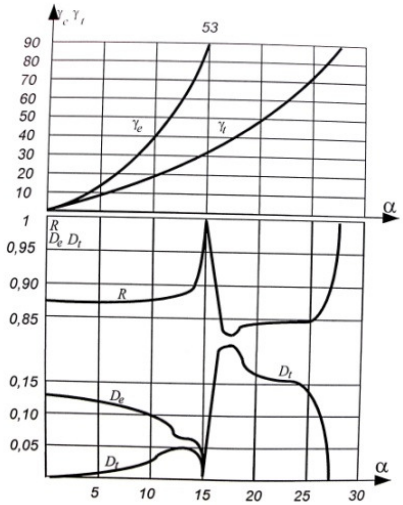


Рисунок 2 – Графики зависимости углов γt,γe и коэффициентов R, De, Dt в зависимости от α для системы вода-сталь.

Необходимо также отметить, что выбор большого значения *γt* не позволяет выявить дефекты, лежащие на внутренней поверхности и в теле трубы.

На рис. 3 центральный луч не отражается от внутренней поверхности трубы, тем самым дефектоскоп будет выявлять преимущественно дефекты на наружной поверхности, а дефекты, лежащие у внутренней поверхности трубы при большой толщине стенки, могут быть не выявлены. Выбираем угол ввода сдвиговых

колебаний в металле $\gamma t = 45^o$, исходя из условий оптимального выявления дефектов, расположенных по всему сечению стенки трубы.

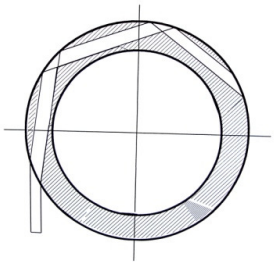


Рисунок 3 – Прохождение ультразвуковых колебаний в трубе с большим углом ввода.

Угол падения ультразвуковой волны на границу вода-сталь для получения сдвиговой волны с углом γt = 45º.

$$\alpha = \arcsin \frac{Cm}{Ct} \sin \gamma t = \arcsin \frac{1485}{3230} \sin 45° = 20° .$$

Для эффективного контроля, помимо выбора соответствующего угла ввода, важен способ создания акустического контакта между преобразователем и трубой. На ПАО «Тагмет» используется бесконтактный способ ввода ультразвуковых колебаний, так как на установке ультразвуковому контролю подвергаются, кроме гладких труб, также и трубы с высадкой внутри. Для обеспечения ввода ультразвуковых колебаний в трубу применён иммерсионный вариант с локальной ванной, который является наиболее удобным для автоматизированного контроля [3].

Применение этого способа позволяет сочетать преимущества иммерсионного и щелевого способа, а именно:

1) контролю могут подвергаться трубы с черновой поверхностью, а также имеющие высадку;

2) обеспечивается постоянство акустического контакта между преобразователем и трубой;

3) при изменении диаметра контролируемой трубы не требуется смена преобразователя, а производится только его регулировка под требуемый диаметр;

4) повышается надёжность работы преобразователя за счёт того, что преобразователь может быть отнесён от поверхности трубы на достаточно большое расстояние;

5) упрощается механическая часть установки, так как не требуется автоматического подведения и отвода датчиков.

Библиографический список

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. «Ультразвуковой контроль металлов» Справочник. М.: Металлургия, 1991.

2. Ермолов И.Н. «Методы ультразвуковой дефектоскопии» ч.I М.Горный институт, 1966 /курс лекций/.

3. Мульчин В.В., Фартушный Р.Н., Ясаев Р.А., Козьев В.Г. и др. Способ автоматизированного неразрушающего контроля качества труб и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение №2351925. Бюл.№10,2009.

Иванов Алексей Николаевич – ПАО «Таганрогский металлургический завод», al_013@mail.ru, г.Таганрог ул.Кузнечная 13 кв.3 т.89081757237, т.89515368406, магистр, мастер в лаборатории средств неразрушающего контроля.

Тимошенко Владимир Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Ivanov Alexey N. – PJSC "Taganrog Metallurgical Factory», al_013@mail.ru, Taganrog Kuznechnaya st.13 ap.3 tel.+79081757237, tel.+79515368406, Magistr, master in the laboratory of nondestructive control.

Timoshenko Vladimir I. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 534.222

И.А. Кириченко, В.Ю. Котов, П.В. Лонкин, Д.С. Слуцкий

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА НАПРАВЛЕННОСТЬ СЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН

В работе представлены результаты теоретических исследований задачи оценки влияния конструктивных характеристик на этапе проектирования на направленность акустических антенн. Проведена оценка влияния отклонения геометрических размеров и пространственных характеристик конструктивных элементов на характеристику направленности параметрической излучающей антенны секторного обзора. Приведены результаты расчета отклонений характеристики направленности отдельного модуля акустической системы от заданного значения угла раскрыва основания антенны, а также отклонений характеристики направленности модуля акустической системы от отклонения излучающей поверхности от вертикали. Расчеты показали, что отклонения от рассчитанных оптимальных углов раскрыва основания антенны и отклонение поверхности антенны от вертикали приводят

к неравномерности основного лепестка характеристики направленности более чем 3дБ.

Ключевые слова: *параметрическая антенна, характеристика направленности, сектор.*

The results of theoretical studies of the problem of estimating the impact of the structural characteristics of the design phase in the direction of the acoustic antennas. The influence of deviations of geometric dimensions and spatial characteristics of the design elements on the directional characteristic of the emitting antenna parametric sector review. The results of the calculation of deviations directional characteristics of individual modules speaker of the specified value of the angle of the antenna base, as well as deviations of the directional characteristics of the speaker module from the radiating surface deviation from vertical. Calculations have shown that deviations from the calculated optimal viewing aperture antenna base and the deviation from the vertical surface of the antenna lead to lead to non-uniformity of the main lobe of the directional characteristics of more than 3dB.

Key words: *acoustic antenna, directivity characteristic, sector.*

Одной из основных проблем при проектировании гидроакустических систем и, в частности, параметрических излучающих систем секторного обзора, является конструктивное оформление антенны. Основным условием при создании параметрической локационной системы является обеспечение высокого коэффициента полезного действия преобразователя накачки. Как правило, параметрические антенны представляют собой антенную решетку, состоящую из двух подрешеток из элементов с разными резонансными частотами [1]. Известно, что для достижения высокого коэффициента полезного действия в параметрической системе необходимо обеспечить коллинеарное взаимодействие высокочастотных волн накачки [2].

Известен метод построения антенны с секторной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости, когда антенна секторного обзора содержит отдельные высоконаправленные преобразователи накачки с плоской апертурой [3]. В такой антенне отдельные направленные преобразователи накачки расположены на криволинейной образующей радиусом R и развернуты друг относительно друга так, чтобы акустические оси двух соседних направленных преобразователей не пересекались. Конструктивно, криволинейная образующая представляет кусочно-линейную аппроксимацию проекций излучающих поверхностей отдельных направленных преобразователей накачки , развернутых друг относительно друга так, что акустические оси двух соседних преобразователей образуют угол.

Оценка влияния отклонения геометрических размеров излучающих поверхностей отдельных направленных преобразователей накачки и углов между акустическими осями преобразователей накачки может быть рассмотрена на примере параметрических антенных систем, разработанных в ОКБ «РИТМ» ЮФУ. На рис. 1 показан внешний вид отдельного антенного модуля, образованного двумя направленными преобразователями накачки, установленными на общем основании.

На этапе проектирования и изготовления антенного модуля важным является выполнение требований по точности значений угла раскрытия основания антенного модуля, который представляет собой кусочно-линейную аппроксимацию проекций излучающих поверхностей отдельных направленных преобразователей накачки, а также отклонение излучающих поверхностей отдельных направленных преобразователей накачки от вертикальной оси.

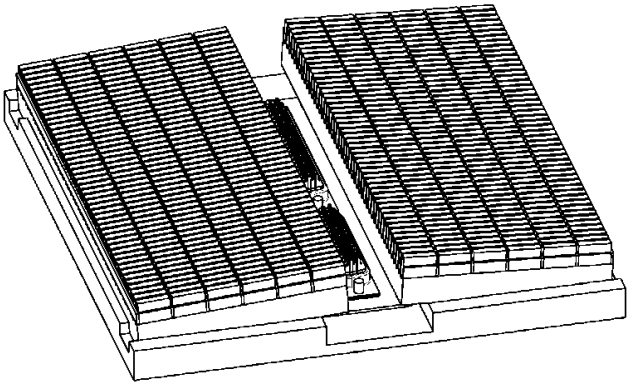


Рисунок 1 – Антенный модуль преобразователя накачки

Геометрия задачи по определению отклонений характеристики направленности (ХН) сектора антенного модуля от заданного значения в горизонтальной плоскости на примере отдельного антенного модуля показана на рис. 2.

Суммарная ХН антенного модуля в горизонтальной плоскости, рассчитанная для значений половин углов между акустическими осями преобразователей накачки, расположенных на ломаной кривой, аппроксимирующей криволинейную образующую в горизонтальной плоскости секторной антенны для центральной частоты накачки, показана на рис. 3.

Анализ результатов расчета суммарной ХН антенного модуля на частоте накачки в горизонтальной плоскости показывает, что для оптимального для заданных волновых размеров преобразователей накачки значения половины угла раскрыва основания антенного модуля между акустическими осями отдельных преобразователей накачки, равном 3,5º, на частоте накачки в основном лепестке ХН отсутствуют неравномерности.

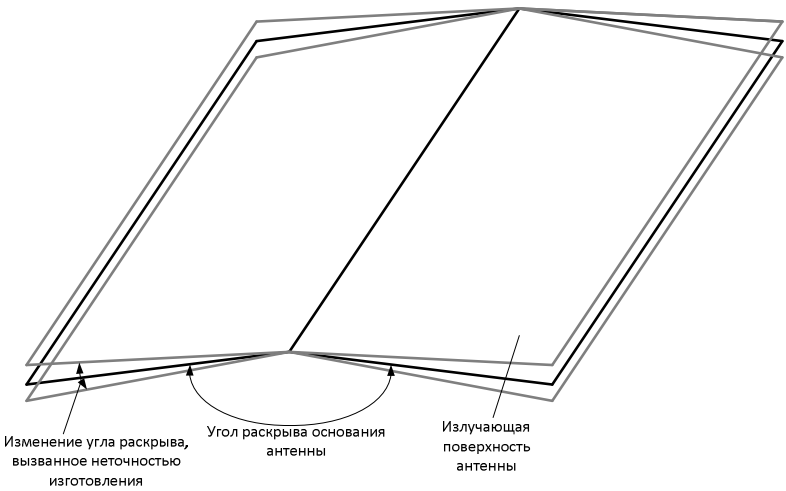


Рисунок 2 – Геометрия задачи отклонений ХН сектора антенного модуля от заданного угла раскрыва

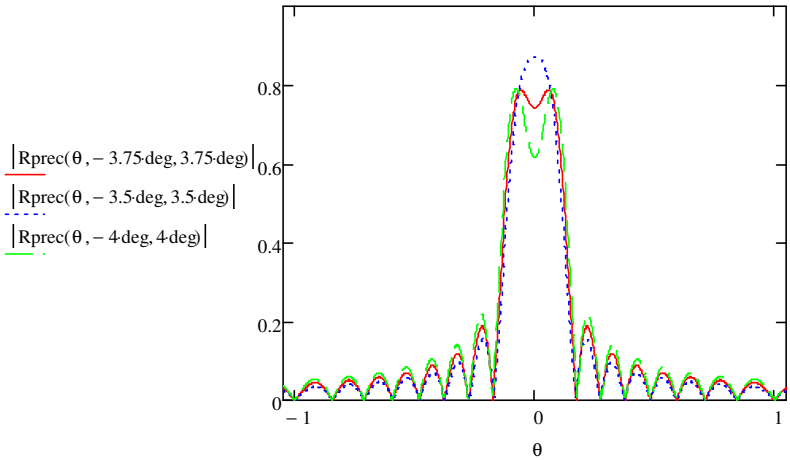


Рисунок 3 – Суммарная ХН антенного модуля на частоте накачки в горизонтальной плоскости

Отклонения значений угла ломаной кривой, аппроксимирующей криволинейную образующую в горизонтальной плоскости секторной антенны на величину 0,25º в большую или меньшую сторону, приводят к неравномерности основного лепестка ХН более чем 3 дБ. Такие неравномерности в виде провала в основном лепестке ХН явно выражены для значений половины угла раскрытия основания антенного модуля 3,75º и 4º.

На рис. 4 показана геометрия задачи по определению ХН сектора антенного модуля при отклонении излучающей поверхности от вертикали.

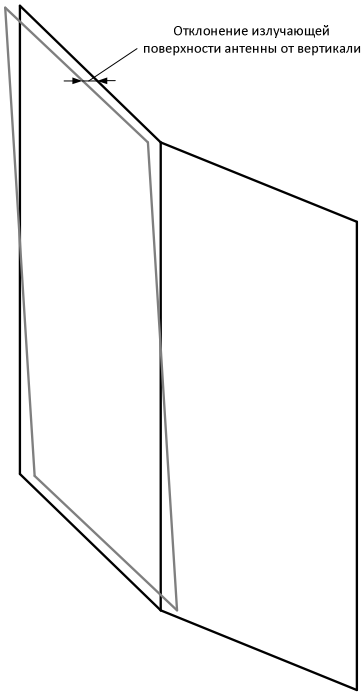


Рисунок 4 – Геометрия задачи определения ХН сектора АС при отклонении излучающей поверхности от вертикали

Суммарная ХН антенного модуля на частоте накачки в горизонтальной плоскости при отклонении излучающей поверхности

от вертикали на величину 0,25º показана на рис. 5. Форма основного лепестка для приведенной на рис. 9 ХН антенного модуля является асимметричной и также имеет провал, превышающий по величине 3 дБ.

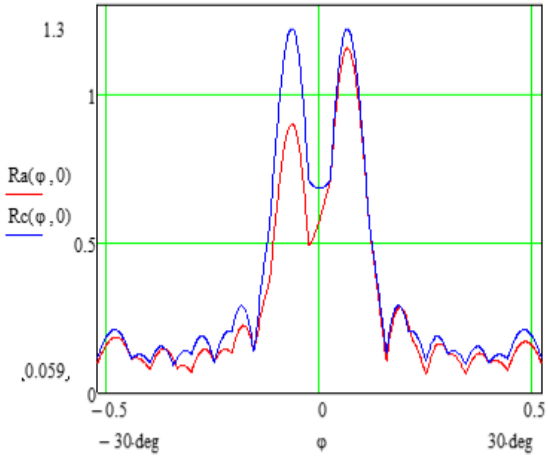


Рисунок 5 – Суммарная ХН антенного модуля на частоте накачки при отклонении излучающей поверхности от вертикали

Секторная ХН для большого значения углов обзора может быть сформирована несколькими антенными модулями. Суммарная ХН $D(\theta)$ при совместной работе нескольких антенных модулей описывается известным выражением [1]:

$$D(\theta) = \sum_{n=-23}^{24} D3\left(\theta - n \cdot \frac{\pi}{24}\right),$$

где $D3(\theta)$ – ХН отдельного антенного модуля на разностной частоте, n – количество антенных модулей.

На рис. 6 представлен результат расчета ХН параметрической секторной антенны при совместной работе n отдельных антенных модулей, конструктивные параметры которых соответствуют

оптимальным значениям. Видно, что такой способ формирования поля волны разностной частоты позволяет обеспечить в заданном секторе обзор в режиме излучения с неравномерностью менее чем 3 дБ.

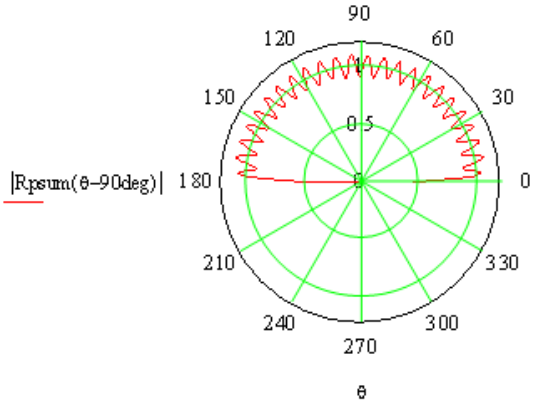


Рисунок 6 – Суммарная ХН антенного модуля на частоте накачки в горизонтальной плоскости

Результат расчета ХН параметрической секторной антенны, для случая отклонения аппроксимирующей криволинейной образующей в горизонтальной плоскости антенны на величину 0,25° показан на рис. 7.

Таким образом, модульный принцип построения параметрической секторной антенны позволяет получить в заданном секторе обзора ХН на разностной частоте с учетом частичного перекрытия парциальных ХН и дает возможность уточнения найденной ранее грубой оценки ширины ХН в горизонтальной плоскости, а учет требований к точности пространственных характеристик антенных модулей в процессе изготовления обеспечивает необходимые направленные свойства секторной акустической антенны.

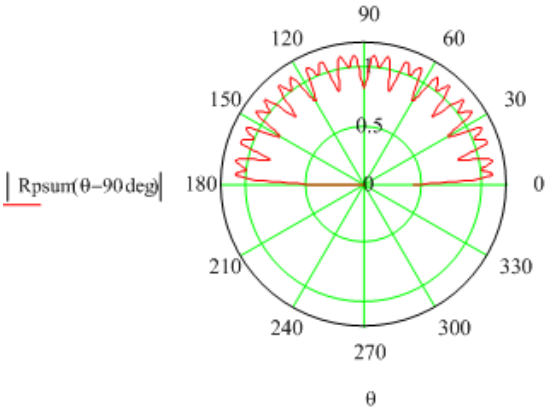


Рисунок 7 – Суммарная ХН антенного модуля на частоте накачки в горизонтальной плоскости

Библиографический список

1.Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2004. – 416 с.

2.Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.

3.Богородский А.В., Яковлев Г. В., Корепин Е. А., Должиков А. К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана / Под ред. В.В. Богородского. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1984. – 264с.

Кириченко Игорь Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Котов Вячеслав Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, инженер.

Лонкин Павел Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, инженер.

Слуцкий Дмитрий Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, старший научный сотрудник.

Kirichenko Igor A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of acoustics and medical technology, associate professor.

Kotov Vyacheslav Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM SFU, engineer.

Loncin Pavel V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”,

Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM SFU, engineer.

Slutsky, Dmitry S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM, southern Federal University, senior researcher.

УДК 534.222

И.А. Кириченко, И.Б. Старченко,
Д.С. Слуцкий, В.Л. Сахаров

ОСВЕЩЕНИЕ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН

В докладе рассматриваются результаты разработки системы для панорамного мониторинга ледовой обстановки в параметрическом режиме работы гидроакустических средств. Проведен анализ формирования и распространения зондирующих сигналов в акустическом канале параметрического измерителя толщины льда, сформулирован принцип измерения толщины по отражению (рассеянию) акустических сигналов от локально плоскослоистой системы с размытыми границами. Проведено математическое моделирование акустической мощности канала измерителя толщины льда и «окон прозрачности» на основе расчёта критических углов падения и преломления. Делается вывод о целесообразности использования в качестве информативных сигналов сдвиговых волн.

Ключевые слова: *Лед, мониторинг, акустическая антенна, критический угол, окно прозрачности.*

The report discusses the results of developing a system for panoramic monitoring of ice conditions in the parametric mode of operation of the hydroacoustic equipment. The analysis of formation and propagation of the probing signals in the acoustic channel parametric measuring the thickness of ice, formulated the principle of thickness measurement by reflection (scattering) of acoustic signals from a locally plane layered systems with blurred boundaries. Mathematical modeling of the acoustic output of the channel measuring the thickness of ice and the "Windows of transparency" on the basis of the calculation of the critical angles of incidence and refraction. The conclusion about expediency of use as informative signals of shear waves.

Key words: *Ice, monitoring, acoustic antenna, the critical angle, the window transparency.*

Морские нефтегазовые ресурсы по различным данным составляют более половины от общемировых ресурсов [1]. При этом значительная часть запасов приходится на Арктический шельф, освоение месторождений которого требует решения многочисленных комплексных задач [2-5], в числе которых можно выделить:

– недостаточная геологическая и геофизическая изученность акваторий Арктического шельфа [2];

– сезонность в проведении геологоразведочных работ и работ по обустройству месторождений [3];

– необходимость разработки новых технологий и техники для бурения, добычи и транспортировки добываемого нефтегазового сырья [4];

– подледные работы, требующие разработки систем мониторинга подледной обстановки [5].

Для своевременного освещения ледовой обстановки, наряду с аэрокосмическими методами получения информации, может быть использован метод, основанный на применении гидроакустических приборов [5], в частности систем на основе нелинейной акустики [6].

Решение навигационных задач и задач освещения ледовой обстановки при подводном плавании носителя акустической системы,

которые возникают при использовании автономных и дистанционных телеуправляемых подводных аппаратов [8], приводит к необходимости разработки и создания новых средств, позволяющих решать задачи ледовой разведки. Основными задачами, решаемыми приборами для мониторинга ледовой обстановки являются:

– измерение расстояния до нижней кромки льда в широком секторе углов над подводным аппаратом и впереди по направлению движения;

– измерение толщины льда;

– определение состояния водной поверхности.

Также, с точки зрения влияния лучевой картины на распространение акустических волн, важно учитывать гидрологические условия в мелководных районах Арктического шельфа [9].

Применение для мониторинга ледовой обстановки приборов на основе нелинейной акустики с использованием параметрической излучающей антенны предполагает учет таких особенностей формирования акустического поля, как наличие как низкочастотной разностной частоты, образованной в результате нелинейного взаимодействия двух близких по значению волн накачки, так и, собственно, высокочастотного излучения исходных волн накачки [6, 7, 12, 13].

Основные требования к гидроакустическим приборам для мониторинга ледовой обстановки на основе нелинейной акустики принципиально не отличаются от требований, которыми руководствуются при разработке традиционных гидроакустических систем [7].

Определенные ограничения накладываются на тракт приема, обработки и регистрации, поскольку рабочая частота приемной антенны не совпадает с частотами, излучаемыми преобразователями накачки [15]. В зависимости от назначения и требуемых характеристик прибора для мониторинга ледовой обстановки прием

отраженных акустических сигналов можно осуществлять на различные типы приемных антенн:

– резонансную антенну с такой же характеристикой направленности, как в режиме излучения (при этом увеличиваются общие размеры акустической системы);

– резонансную антенну с такими же, как у преобразователя накачки, линейными размерами (при этом характеристика направленности оказывается в режиме приема шире, чем в режиме излучения);

– дополнительную широкополосную антенну, размещенную рядом с преобразователями накачки (вокруг него или встроенную в него).

Решение задачи измерения толщины льда предполагает пространственную фильтрацию эхосигнальной информации, которая будет обеспечивать локальное измерение толщины льда и панорамный обзор в поперечной плоскости. Пространственная фильтрация в таких системах реализуется путем формирования и управления пространственных каналов в режиме излучения волн накачки [5]. На рис. 1 показан принцип мониторинга толщины льда с использованием прибора на основе нелинейной акустики.

Нелинейный способ генерации зондирующих измерительных сигналов прибора для мониторинга толщины льда позволяет обеспечить формирование в низкочастотной области спектра узкой характеристики направленности с уровнем бокового поля вне основного лепестка не более минус 40 дБ [6].

В качестве метода измерения толщины ледового покрова, принцип действия которого показан на рис. 1, можно использовать импульсный метод, в основе которого лежит измерение времени задержки импульсных сигналов при распространении их в толще льда [14]. Величины скорости продольных и сдвиговых волн в морском льде характеризуются высокой степенью изменчивости. Источником возникновения погрешности в величине скорости также может

оказаться значительная неоднородность этого параметра по вертикальной координате [16].

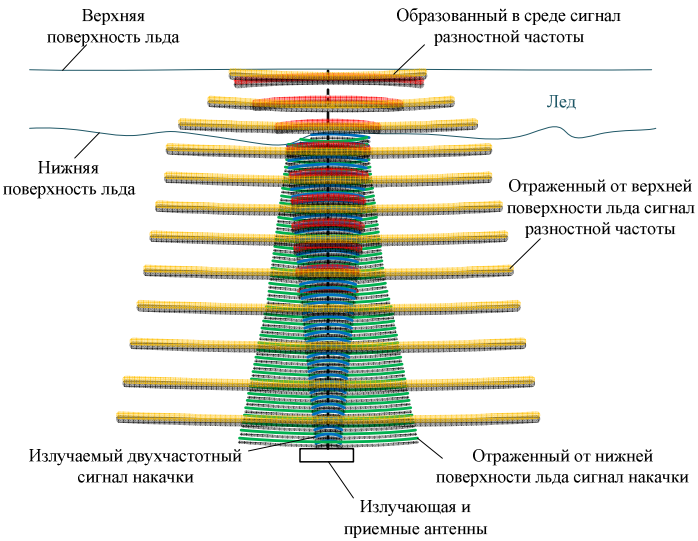


Рисунок 1 – Принцип мониторинга толщины льда с использованием прибора на основе нелинейной акустики

Лед как твердая среда допускает в дополнение к волнам давления также распространение поперечных волн. Соответствующая поперечная составляющая скорости звука будет меньше, чем скорость продольной компоненты. Общим выводом работы [18] является значительная изменчивость скорости продольных волн в льде, связанная с условиями его образования. В то же время величина скорости сдвиговых волн отличается большей стабильностью и устойчивостью к изменению условий образования ледяного покрова. Зависимость коэффициентов прохождения из воды в лед по энергии для продольных Dl(θ) и поперечных Dt(θ) от угла падения волн для значений скорости продольных волн – 3980 м/с, скорости поперечных волн – 1960 м/с показана на рис. 2.

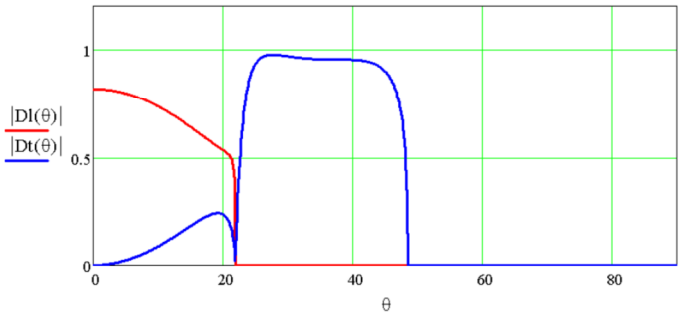


Рисунок 2 – Результаты расчета критических углов

Определенные для данного случая значения первого и второго критических углов равны αкр1=22,1^0 и αкр2=48,9^0, соответственно. Максимальный угол падения, при котором возможно измерение толщины льда на продольных волнах – 22,1^0, а на поперечных волнах – 48,9^0. Таким образом, явление полного внутреннего отражения зондирующих сигналов при углах больше 22,1^0 будет являться ограничивающим фактором для реализации зондирования пространства впереди автономного носителя с использованием продольных волн. Поэтому для значений углов падения больше 22,1^0, необходимо использовать в качестве информативных сигналов сдвиговые волны.

Библиографический список

1 Авдонин В.В., Кругляков В.В., И.Н. Пономарева, Титова Е.В. Полезные ископаемые Мирового океана М.: МГУ. – 2000. – 160 с.

2 Ефремкин И.М., Холмянский М.А. Геоэкологическое сопровождение освоения нефтегазовых месторождений арктического шельфа. – СПб.: Недра, 2008. – 315с.

3 Гаврилов В.П. О целесообразности ускорения освоения нефтегазовых ресурсов арктических морей и прилегающих районов Крайнего Севера России // Нефть, газ Арктики: материалы междунар. науч.-техн. конф. – М., 2006. – С.343 –351.

4 Ильин Г. В., Шавыкин А.А. Освоение северных маршрутов транспортировки нефтегазового сырья и связанные с этим экологические проблемы // Ученые зап. Мурман. гос. пед. Ун-та. Сер. Геогр. науки. – 2007. – No 2. – С. 72 –90.

5 Богородский А.В., Лебедев Г.А. Основные принципы построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Пробл. Арктики и Антарктики. – 2009. – №1. – С. 69–79.

6 Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1990. – 256 с.

7 Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2004. – 416 с.

8 Автономные подводные роботы: системы и технологии Агеев М.Д., Киселев Л.В, Матвиенко Ю.В. и др. М.: Наука. – 2005. – 398с.

9 Сташкевич А.П. Акустика моря. - Л. : Судостроение – 1966. – 334 с.

10 Буланов, В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей [Текст] / В.А. Буланов. Дальнаука. – 2001. – 280 с.

11 Кириченко И.А., Коновалова С.С. Экспериментальное исследование обратного объемного рассеяния на моделях рассеивателей // Известия ТРТУ. – Таганрог, 2002. – №6(29). – С.97–103.

12 Тарасов С.П., Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тимошенко В.И.Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов–на–Дону: Ростиздат, 2007. – 448с.

13 Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. СПб.: Наука. - 2004. – 410 с.

14 Нагучев Д.Ш., Сахаров В.Л., Савицкий О.А. Разработка технологии создания технических средств освещения ледовой

обстановки в параметрическом режиме // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №12 (89). – С. 155-159.

15 Богородский В.В., Гусев А.В. Затухание звуковых волн во льду в диапазоне частот 200–1100кГц // Акустический журнал. – т.19. вып.2. - 1973. - С. 133-139.

Кириченко Игорь Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Старченко Ирина Борисовна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, директор.

Сахаров Вадим Леонидович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, заместитель директора.

Слуцкий Дмитрий Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, ОКБ РИТМ ЮФУ, старший научный сотрудник.

Kirichenko Igor A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, associate professor.

Starchenko Irina B. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM SFU, Director.

Sakharov Vadim L. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM yufu, Deputy Director.

Slutsky, Dmitry S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, OKB RITM, southern Federal University, senior researcher.

УДК 534.2

В.С. Корнилов, А.П. Морозов
Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ
А.П. Морозов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБАСТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Целью данной статьи является обоснование целесообразности использования робастной обработки сигналов в

ультразвуковой дефектоскопии. В реальных условиях функционирования ультразвукового дефектоскопа априорная информация о плотности распределения помехи или сигнала известна лишь частично. В связи с этим большой интерес представляет разработка и использование в УЗ дефектоскопии функционально устойчивых методов обнаружения сигналов, обладающих свойством сохранять в некоторых пределах свои характеристики при небольших изменениях плотности распределения вероятности помехи. Надёжная и устойчивая работа систем обнаружения при априорной неизвестности и изменяющихся внешних условиях функционирования реализуется робастными методами, имеющими простую техническую реализацию. В результате робастные обнаружители более предпочтительны при разработке приборов неразрушающего контроля и УЗ дефектоскопов.

Ключевые слова: *робастный; ультразвуковой; дефектоскопия; сигнал; помеха; неразрушающий контроль.*

The purpose of this article is to validate the feasibility of the use of robust signal processing in ultrasonic flaw detection. In real conditions of functioning of the ultrasonic flaw detector a priori information about the density distribution of the interference signal or only partially known. In this regard, of great interest is the development and use in ultrasonic flaw detection of functionally sustainable methods of detecting signals having the property to retain to some extent their characteristics of small changes in the density of distribution of probability of interference. Reliable and stable operation of the detection systems under a priori uncertainty and changing external conditions of functioning of the implemented robust methods, which has a simple technical implementation. As a result of robust detectors advantageous for the development of instruments of nondestructive testing and ultrasonic flaw detectors.

Key words: *robust; ultrasonic; flaw detection; signals; disturbance; nondestructive check.*

Классическая теория оптимального обнаружения сигналов при наличии помех, основанная на байесовском подходе к проверке статистических гипотез, позволяет решить задачу обнаружения при

полной априорной информации о сигнале, помехе и способе их взаимодействия.

Например, в современном ультразвуковом дефектоскопе УД9812 [1] (см. рис. 1,2), обнаружителем сигнала является типовой тракт обнаружения (ТТО), основным функциональным узлом которого является квадратичный детектор. Тракт синтезирован на предположении, что сигнал и помеха взаимодействуют аддитивно и являются стационарными случайными процессами с нормальными плотностями распределения вероятностей (ПРВ). Данный обнаружитель дефектоскопа является оптимальным только при выполнении условий синтеза.

В реальных условиях функционирования ультразвукового дефектоскопа априорная информация о плотности распределения помехи (или сигнала) известна лишь частично. Например, известно, что оно близко к нормальной, но информация о поведении «хвостов» распределения отсутствует [2].

Рисунок 1 – Ультразвуковой дефектоскоп УД8912

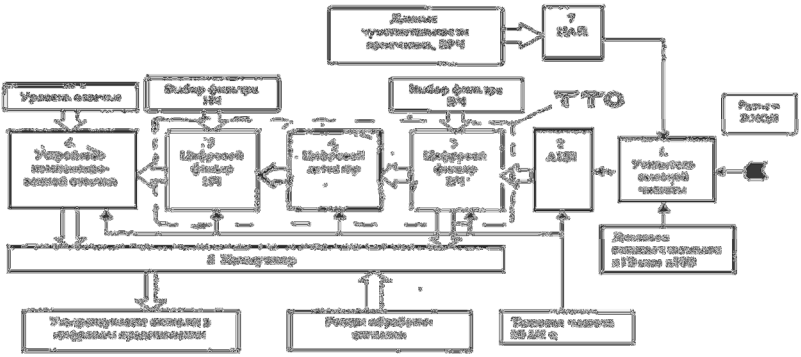


Рисунок 2 – Структурная схема УЗ дефектоскопа УД8912

Кроме того, при контроле материалов и изделий из материалов со сложным составом возникает структурный шум (помеха), эхограмма представлена на рис. 3. Эта помеха является «порождением» зондирующего сигнала, т.е. коррелированна с ним и поэтому искажает его статистические характеристики, в том числе и ПРВ [3].

Таким образом, возможности применения УЗ дефектоскопов реализующих оптимальные алгоритмы обнаружения, основанные на классической теории обнаружения, в указанной выше ситуации ограничены из-за высокой чувствительности этих алгоритмов к малым отклонениям ПРВ помехи (или сигнала) от предполагаемой.

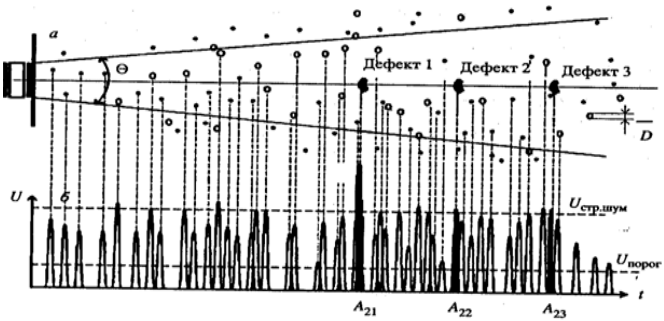


Рисунок 3 – Эхограмма изделия из материала со сложноструктурным составом

Например, для обнаружителя выборочного среднего, оптимального по критерию Неймана-Пирсона при заданном уровне ложных тревог 0,005, известном сигнале m = 0,06 и нормальной помехи с плотностью распределения вероятности

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad \sigma = 1, \tag{1}$$

вероятность ложных тревог в случае ε - загрязнённой помехи с плотностью

$$W_\varepsilon(x) = \frac{(1-\varepsilon)}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] + \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi}k\sigma}\exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2k^2\sigma^2}\right], \tag{2}$$

$$k = 10, \qquad \varepsilon = 0{,}01$$

увеличивается по сравнению с величиной заданной в 7 раз [4].

В результате анализа литературных источников [1-4], а также на основании проведенных расчетов установлено, что для ТТО с квадратичным детектором, при обнаружении гауссовского сигнала, с заданным по критерию Неймана-Пирсона порогом $P_{ЛТ} = 0{,}001$, при ε – загрязненной помехе, и k=6, частота ложных тревог возрастает до уровня $P_{ЛТ} = 0{,}0076$ ($\varepsilon = 0{,}1$) или даже до уровня $P_{ЛТ} = 0{,}08$ ($\varepsilon = 0{,}3$).

Полученные результаты позволяют заключить:

– вследствие вышесказанного большой интерес представляют разработка и использование в УЗ дефектоскопии функционально устойчивых методов обнаружения сигналов, обладающих свойством сохранять в некоторых пределах свои характеристики при небольших изменениях плотности распределения вероятности помехи;

– такие методы называют робастными, а структуры, их реализующие, обеспечивают надёжную и устойчивую работу систем обнаружения при априорной неизвестности и изменяющихся внешних условиях функционирования;

– при синтезе робастного обнаружителя предполагаются простота технической реализации, снижение требований к точности изготовления основных элементов устройств [5];

– подавляющее большинство практических ситуаций обнаружения акустических сигналов характеризуется большей или меньшей степенью априорной неопределенности, поэтому робастные обнаружители более предпочтительны при разработке приборов неразрушающего контроля и УЗ дефектоскопов.

Библиографический список

1. Дефектоскоп ультразвуковой УД 9812 "Уралец" [Текст]/ «Неразрушающий контроль»// Режим доступа. – URL: http://www.ncontrol.ru/catalog/Ultrazvukovoj-kontrol/Ultrazvukovye-defektoskopy/Defektoskop-ul-trazvukovoj-UD-9812-Uralec (дата обращения 09.12.2013).

2. Антонов, О.Е. Оптимальное обнаружение сигналов в негауссовых помехах. [Текст]/ О.Е. Антонов// т.12 – М. : Радиотехника и электроника, 1983. – с.779-787.

3. Качанов, В.К. и др. Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов. [Текст]/ В.К. Качанов// №9 – М. : Дефектоскопия, 2007. –с.71-86.

4. В.М.Черницер, А.П.Морозов, А.М. Гаврилов, Р.О. Ситников. Акустические сигналы и методы их обработки: Учебное пособие. –Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2010. – 252 с.

5. Оводенко, А.А. Робастные локационные устройства. [Текст]/ А.А. Оводенко// – Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. – 184 с.

Корнилов Василий Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), E-mail: koresh-jr@yandex.ru; Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Морская, д. 10А, 8-904-50-75-783, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Морозов Анатолий Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: morozov.tolik2013@yandex.ru; Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Коралловая, д. 48; 8-918-557-71-84; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, кандидат технических наук; доцент.

Kornilov Vasily S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: koresh-jr@yandex.ru; Russia, Rostov reg., Taganrog, St. Morskaya, 10A, 8-904-50-75-783, department of electrohydroacoustics and medical engineering, the undergraduate.

Morozov Anatoly P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: morozov.tolik2013@yandex.ru; Russia, Rostov reg., Taganrog, Coral street, 48; 8-918-557-71-84; department of electrohydroacoustics and medical engineering, candidate of technical science; assistant Professor.

УДК 534

Н.А. Крымская, А.П. Морозов

Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ А.П. Морозов

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Целью данной работы является структурный синтез устройства оценки мгновенной частоты ЭЭГ- сигналов. Технической задачей биомедицинской инженерии является разработка алгоритма и устройства, его реализующего, позволяющего уменьшить систематическую погрешность измерения мгновенной частоты ЭЭГ – сигнала и тем самым повысить клиническую полезность нового информативного параметра электрической активности головного мозга.

Ключевые слова: *электроэнцефалография, мгновенная частота, систематическая погрешность*

The purpose of this work is structural synthesis of the device of an assessment of instant frequency of EEG - signals. The technical problem of biomedical engineering is development of algorithm and the device it the realizing measurement of instant frequency of EEG allowing to reduce a systematic error – a signal and by that to increase clinical usefulness of new informative parameter of electric activity of a brain.

Key words: electroencephalography, instantaneous frequency, bias

На протяжении многих десятилетий в рамках радиоэлектроники разрабатываются и совершенствуются методы и устройства обработки биомедицинских сигналов, а также методы их анализа и выделения информации.

Известные на сегодняшний день методы численного анализа временных ЭЭГ-сигналов, и приборы их реализующие, не в состоянии осветить все стороны биоэлектрической активности мозга. Каждый из

этих методов позволяет охарактеризовать лишь отдельную сторону данного физиологического процесса с позиции спектрального или корреляционного анализа ЭЭГ-сигнала. Однако, для обработки электроэнцефалограмм необходимо применение комплекса различных методов, учитывающих специфические особенности биоэлектрических потенциалов мозга человека. Поэтому ООО «Компания TREDEX» (г. Харьков) провела ряд экспериментальных исследований (на крысах) по использованию мгновенной частоты ЭЭГ-сигнала в качестве нового информационного параметра, что позволило зафиксировать переходной процесс от сна (комы) к бодрствованию падением частоты в диапазоне δ -ритма.

При этом, для оценки частоты используется классический частотный детектор пересечения нулевого уровня, реализующий простой алгоритм:

$$f = \frac{n}{T} \tag{1}$$

где n – число точек пересечения ЭЭГ-сигналом, с положительной производной, нулевого уровня на мерном интервале T временного окна.

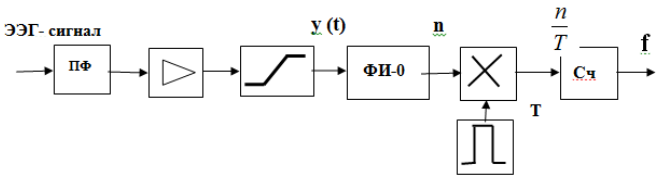


Рисунок 1 – Структурная схема частотного детектора

Сигнал на выходе линейной части частотного детектора

$$y(t) = A_{mc}\cos(\omega t + \varphi_c) + N(t) \tag{2}$$

поступает на формирователь импульсов (ФИ-0), который формирует серию импульсов, привязанных к определённому значению фазы входного сигнала, т.е. к моментам перехода входного сигнала нулевого уровня (через π или 2π радиан). Таким образом, на выходе ФО-0 образуется последовательность импульсов, определяемая фазой сигнала

$$\varphi(t) = \varphi_c + \omega t + \frac{1}{2!}\dot{\omega}t^2 + \frac{1}{3!}\ddot{\omega}t^{3+} \cdots\cdots + \varphi_N(t) \qquad (3)$$

Подобная замена здесь допустима, так как интересующая нас информация содержится в фазе сигнала **y (t),** и эффективная величина шумового напряжения **N (t)** (помехи) будет определять величину фазовых флуктуаций.

В результате дифференцирования по времени выражения (2) получим условный частотный сигнал

$$\dot{\varphi}(t) = \omega + \dot{\omega}t\frac{1}{2!}\ddot{\omega}t^2 + \dot{\cdots}\cdots + \dot{\varphi}_N(t) \qquad (4)$$

Очевидно, что $\varphi_N(t)$ в (3) и $\dot{\varphi}_N(t)$ в (4) будут вызывать шумовые ошибки в измерении фазы и частоты. При этом, действие шумовых ошибок на схему формирования импульсов приведет к флюктуациям импульсов относительно расчетного значения, поскольку будут флюктуировать моменты прохождения напряжения сигнала через нуль (аддитивная помеха) [1]. Кроме того, в моменты времени замираний амплитуды входного сигнала, обусловленные структурной помехой (ЭКГ, накладывающаяся на ЭЭГ; сетевая наводка) будут иметь место значительные выбросы мгновенной частоты, которые приводят к появлению дополнительных пересечений нулевого уровня входным сигналом (мультипликативная помеха). Таким образом, наличие аддитивной помехи в совокупности с мультипликативной вызовет ошибку в счете периодов n и возникновении систематической погрешности измерения частоты ЭЭГ-сигнала.

Для оценки погрешности измерения частоты сигнала используется величина стандартного отклонения [2]

$$\sigma_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}qT} \qquad (5)$$

Таким образом, ошибка (погрешность) измерения обратно пропорциональна отношению сигнал/помеха q и величине мерного интервала T. Однако соотношение (5) справедливо, когда q >>1. При малом q измерения становятся ненадёжными, величина ошибки резко возрастает, значительно превосходя значения вычисленные по (5).

Увеличение дисперсии при q, близких к пороговому значению, можно оценить зависимостью [3]:

$$\frac{\sigma_{1f}^2}{\sigma_f^2} \approx 1 + \left(\frac{T\Delta f_{\text{ЭФ}}}{12}\right)^2 q^4 e^{-\frac{q^2}{2}}, \qquad (6)$$

где σ_{1f}^2 – дисперсия частоты при q, близких к пороговому значению,

σ_f^2 – дисперсия частоты при $q \gg q_{\text{пор}}$

Формула (6) свидетельствует о наличии порога, так как сравнительно небольшие изменения q могут вызвать резкие изменения σ_{1f}^2 (рис.2).

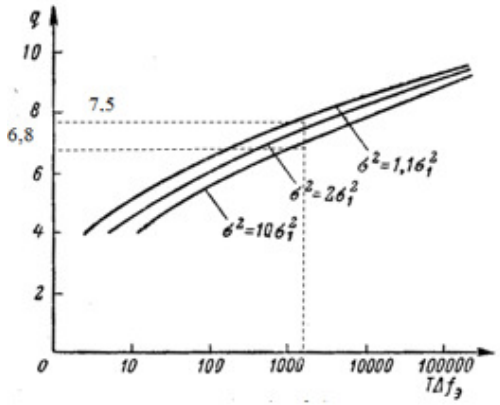


Рисунок 2 – Кривые для различных значений относительного увеличения дисперсии

Как видно из рис. 2, изменение q от 7,5 до 6,8 при $T\Delta f_{эф} = 1000$, приводит к изменению $\sigma_{1f}^2 / \sigma_f^2$ от 1,16 до 10. При дальнейшем уменьшении q рост $\sigma_{1f}^2 / \sigma_f^2$ происходит ещё более интенсивно.

Таким образом, при измерении частоты ЭЭГ-сигнала классическим частотным детектором «нулевого уровня» при значениях q, близких к пороговому, погрешность измерения может быть недопустимо большой.

Поэтому представляет практический интерес разработка алгоритма и устройства, его реализующего позволяющего уменьшить систематическую погрешность измерения мгновенной частоты ЭЭГ-сигнала и тем самым повысить клиническую полезность нового информативного параметра электрической активности головного мозга.

Очевидно, что эта научно-техническая задача биоинженерии является актуальной. Целью работы является структурный синтез устройства оценки мгновенной частоты ЭЭГ-сигналов. ЭЭГ-сигналы всех ритмов являются нестационарными процессами и их не стационарность обусловлена, в основном, изменением средней частоты сигнала [4].

Синтез устройства

ЭЭГ-сигнал, имеющий амплитудную и фазовую (угловую) модуляцию, описывается формулой

$$u(t) = U(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \qquad (7)$$

Это выражение можно представить в следующем виде:

$$u(t) = Re\{U(t)e^{j[\omega_0 t+\varphi(t)]}\} = Re\left[U(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\omega_0 t}\right] = Re\left[\dot{U}(t)e^{j\omega_0(t)}\right], \qquad (8)$$

где $\dot{U}(t) = U(t)e^{j\varphi(t)}$

Представим комплексную амплитуду в следующем виде:

$$U(t) = \dot{U}_C(t) + jU_S(t),$$

где $\begin{cases} \rightarrow \text{синфазная} \quad U_C(t) = U(t)\cos\varphi(t) \\ \rightarrow \text{квадратурная } U_S(t) = U(t)\sin\varphi(t) \end{cases}$ составляющие сигнала u(t)

Представление сигнала квадратурными составляющими позволяет производить полноценную обработку без использования несущей частоты ω_0. Фаза сигнала дается выражением: $\varphi(t) = \text{arctg}\left[\frac{U_S(t)}{U_C(t)}\right]$. Мгновенная частота в момент времени t равняется скорости изменения этой фазы во времени, поэтому дифференцирование обеих частей равенства дает алгоритм оценки мгновенной частоты сигнала.

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{U_S(t)\cdot U_C'(t) - U_C(t)\cdot U_S'(t)}{\left[U_C^2(t) + U_S^2(t)\right]} \qquad (9)$$

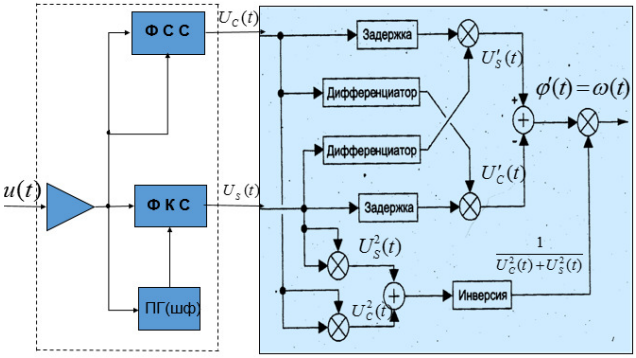


Рисунок 3 – Структурная схема устройства оценки мгновенной частоты, реализующая алгоритм (9)

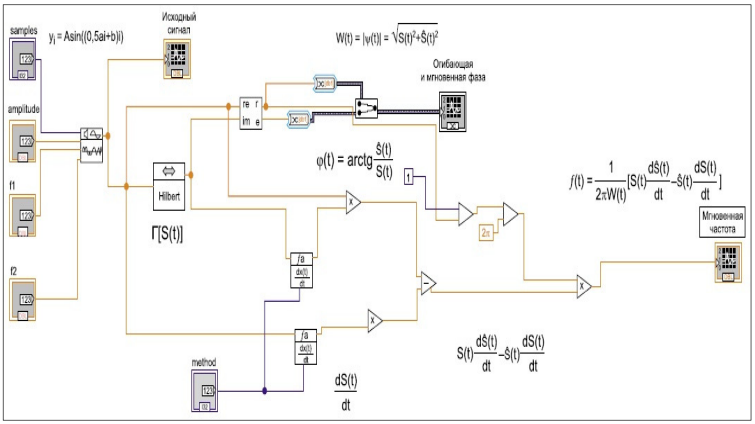


Рисунок 4 – Структурная схема имитационного моделирования устройства мгновенной частоты в среде LABVIEW

Полученные результаты позволяют заключить:

– разработаны алгоритм и устройство, его реализующее, позволяющее уменьшить систематическую погрешность измерения мгновенной частоты ЭЭГ-сигнала и тем самым повысить клиническую полезность нового информативного параметра;

– техническая реализуемость и работоспособность синтезированного устройства проверена имитационным моделированием в среде LabVIEW.

Библиографический список

1.Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. Пер.с анг.под ред. А.П.Немироко-М:ФИЗМАТЛИТ,2007 с.440.

2.Тихонов В.И. Нелинейные преобразования случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1986, с. 295

3.Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в допплеровских системах. М.: Сов. радио, 1967, с. 255.

4.Каплан А.И. Нестационарная ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ. – Успехи физиологических наук, 1998, т. 29, № з, с. 3.

Крымская Наталья Александровна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), E-mail: www.tru_lu@mail.ru ; г.Таганрог,ул. Василенко 2; 89526049768, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Морозов Анатолий Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: morozov.tolik2013@yandex.ru; Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Коралловая, д. 48; 8-918-557-71-84; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, кандидат технических наук; доцент.

Krymskaya Natalya A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, E-mail: www .tru_lu@mail.ru; Taganrog, Vasilenko St. 2; 89526049768, department of electrohydroacoustics and medical engineering, student.

Morozov Anatoly P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: morozov.tolik2013@yandex.ru; Russia, Rostov reg., Taganrog,

Coral street, 48; 8-918-557-71-84; department of electrohydroacoustics and medical engineering, candidate of technical science; assistant Professor.

УДК 681.391

И.А. Кириченко, И.И. Кириченко, Д.М. Кумова
Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ
И.А. Кириченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА

В докладе рассмотрены вопросы, касающиеся теоретических исследований акустических параметров слуховой улитки человека. Получены зависимости распространения скорости звука, амплитуды звукового давления и акустического импеданса от длины мембраны. Проведено сравнение полученных значений для мужчин и женщин.

Ключевые слова: *слуховая улитка, скорость звука, акустический импеданс.*

The report addressed issues concerning the theoretical studies of the acoustic parameters of the cochlea of human hearing. The dependences of propagation velocity of sound, the sound pressure amplitude of the acoustic impedance and the length of the membrane. A comparison of the values obtained for men and women.

Key words: *auditory cochlea, the speed of sound, the acoustic impedance*

Слуховой анализатор человека является нелинейной системой. При относительно линейном поведении наружного уха среднее ухо при повышенных уровнях звукового давления проявляет свой нелинейный характер. По мнению большинства исследователей, это связано с рефлекторным сокращением одной из двух мышц, находящихся в полости среднего уха, при больших уровнях сигнала [1].

При проведении диагностики состояний структур среднего уха, а также измерении акустического импеданса можно использовать метод импедансной аудиометрии. Акустический импеданс представляет собой суммарное сопротивление, которое оказывают структуры среднего уха. Его можно вычислить с помощью объемных скоростей и звукового давления [2]:

$$Z = \frac{P}{c}, \tag{1}$$

В работе [3] были получены выражения для вычисления скорости звука и звукового давления в полости уха:

$$c(x) = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \rho_0 c_0^2 K(x) U[K(x)]}}, \tag{2}$$

$$P(x) = P_0 \sqrt{\frac{c(x)}{c_0}} exp[-\frac{2\rho_0 \beta^3 \Omega^4}{\pi^2 S \rho} \times$$
$$\times \int_0^x \frac{c(x)L(x)}{h(x)} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n+3}{2}} dx}{n^2[(n^2\omega(x)^2 - \Omega^2)^2 + \beta(x)^2\Omega^2]^2}]. \tag{3}$$

Для расчета модели структур уха были использованы значения, полученные экспериментально для мужчин и женщин [4].
На рис. 1 представлен график зависимости распространения скорости звука c(x) (м/с) от длины мембраны (м).

На рис. 1 обозначено: c1(x) – скорость звука у женщин в полости уха, c2(x) – скорость звука у мужчин. Из данного графика следует, что есть отличия прохождения звука в полости уха у мужчин и женщин, это связано с тем, что звуковые колебания разной частоты вовлекают в колебательный процесс мембрану на всем ее протяжении неодинаково. Также локализация амплитудного максимума волны на мембране зависит от частоты звука.

Таким образом, в процесс возбуждения при действии звуков разной частоты вовлекаются разные рецепторные клетки спирального органа [1].

На рис. 2 представлен график зависимости амплитуды звукового давления от длины мембраны.

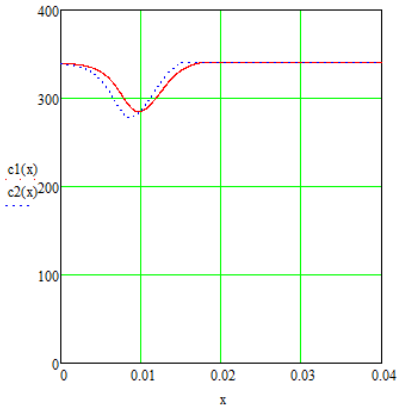


Рисунок 1 –Зависимость распространения скорости звука от длины мембраны

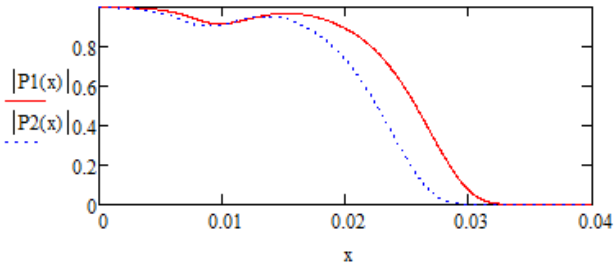


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды звукового давления от длины мембраны

Анализ зависимостей на рис. 2 показывает, что амплитуда звукового давления для мужчин и женщин практически одинакова, достигает своего максимума 0,9 Н/м^2 в начале координат x=0м, но убывает быстрее у мужчин.

На основе рассчитанных параметров – звукового давления и скорости звука – были получены зависимости акустического импеданса от длины мембраны, представленные на рис. 3.

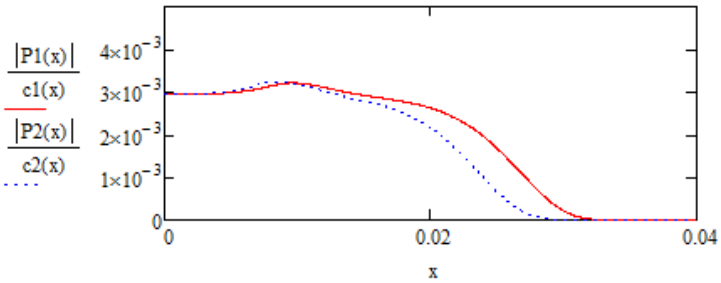


Рисунок 3 – Зависимость акустического импеданса от длины мембраны

Анализ полученных зависимостей акустического импеданса от длины основной мембраны позволяет сделать вывод о том, что акустический импеданс, рассчитанный для экспериментальных значений, имеет одинаковое максимальное значение 3 мОм.

Таким образом, на основе математической модели строения слуховой улитки человека, рассмотренной в [3], исходных данных, полученных экспериментально в [4], в среде Mathcad были рассчитаны зависимости амплитуды скорости звука, звукового давления и акустического импеданса от длины мембраны при прохождении через полость уха.

Библиографический список

1. Физиология человека: Учебник / Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. – М.: Медицина. – 2003. – 656с.

2. Кочкин Р.В. Импедансная аудиометрия. – М.: Медицина. - 2006. – 48 с.

3. Варин В.П., Петров А.Г.. Математическая модель слуховой улитки человека. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. - 2008.- № 96.- 26 с.

4. Богданова Н.В., Зубченко О.А., Найда С.А., Сирдов К.Н. О статистической и индивидуальной частотной зависимости порога слышимости // Акустические приборы и системы. – Киев. – 2013. – С.43–48

Кириченко Игорь Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Кириченко Инна Игоревна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Кумова Дарья Михайловна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Kirichenko Igor A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, postgraduate student, associate professor.

Kirichenko Inna I. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, postgraduate student.

Kumova Darya M. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”,

Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, undergraduate student.

УДК 615.47:616-072.7

И.А. Кириченко, И.И. Кириченко, Д.М. Кумова
Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ
И.А. Кириченко

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СУБЪЕКТИВНЫХ И ОБЪЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СЛУХА

В докладе рассмотрены результаты регрессионного анализа тональных пороговых аудиограмм и тимпанограмм пациентов с диагнозом отит. Определены средние значения коэффициента корреляции для выделенных частотных интервалов тональных аудиограмм и выделенных областей внутрибарабанного давления на примере тимпанограмм типа С. Показано, что в качестве значащего признака силы связи можно учитывать знак коэффициента корреляции для рассматриваемых случаев отклонения от нормы.

Ключевые слова: *тональная пороговая аудиограмма, тимпанограмма, коэффициент корреляции.*

The report discusses the results of the regression analysis tone threshold audiograms and tympanograms patients with a diagnosis of otitis media. Determined average values of the correlation coefficient for the selected frequency intervals and tonal audiograms of selected areas intraorgan pressure on the sample tympanograms type C. It is Shown that as a significant sign of strength could take into account the sign of the correlation coefficient for the considered cases of deviation from the norm.

Key words: *tone threshold audiogram, tympanogram, the correlation coefficient.*

Особенности слухового восприятия и виды нарушений слуха определяются по результатам исследований слуховой системы как субъективными, так и объективными методами аудиометрии. К субъективным методам диагностики слуха может быть отнесена тональная пороговая аудиометрия, позволяющая исследовать способность человека слышать чистые тона [1]. Импедансная аудиометрия является одним из методов объективной оценки слуха, который представляет собой комплекс клинических тестов, основанных на измерении импеданса среднего уха [2]. Классификационные признаки тональной аудиограммы и результаты однофакторного регрессионного анализа, рассмотренные в [3], можно дополнить признаками тимпанограмм, а так же рассмотрением их качественных и количественных показателей. Направление и сила корреляционной связи характеризуются коэффициентом линейной корреляции Пирсона [4].

Рассмотрим задачу по установлению корреляционной связи результатов исследования слуховой функции и использованию коэффициента корреляции для произвольной тональной аудиограммы пациента с диагнозом отит и тональной аудиограммы нормального слуха. Воспользуемся исходными данными результатов тональной аудиометрии, представленными в [5]. При проведении регрессионного анализа полный частотный диапазон (ЧД) 50–8000 Гц был разбит на три поддиапазона: низких частот (НЧ) 50–500 Гц, средних частот (СЧ) 500–2500 Гц и высоких частот (ВЧ) 2500–8000 Гц [5]. Вычислялись средние значения коэффициента корреляции для воздушной (ВП) и костной проводимости (КП) и среднеквадратические отклонения (СКОв, СКОк). Результаты расчета значений коэффициента корреляции для выделенных частотных интервалов на примере аудиограмм, соответствующих диагнозу отит и нормальному слуху, представлены в таблице 1.

В системе импедансной аудиометрии выделяют четыре важных параметра: объем наружного слухового прохода, пик комплианса, давление пика и ширина тимпанограммы. Регрессионный анализ позволяет определить связь двух параметров исследуемой тимпанограммы и тимпанограммой, соответствующей норме такими,

как пик комплианса и ширина тимпанограммы. При проведении регрессионного анализа область внутрибарабанного давления (-400; +400 даПа) была разбита на два поддиапазона: отрицательная область (-400; 0 даПа) и положительная область (0; +400 даПа).

Таблица 1

Средние значения коэффициента корреляции для выделенных частотных интервалов на примере тональных пороговых аудиограмм				
Частотный диапазон	ВП	СКОв	КП	СКОк
Полный частотный диапазон (50 – 8000) Гц	–0,01	0,15	0,58	0,19
НЧ (50 –500) Гц	–0,74	0,25	0,85	0,14
СЧ (500–2500) Гц	–0,92	0,16	–0,21	0,11
ВЧ (2500–8000) Гц	0,32	0,12	0,64	0,14

С использованием исходных данных результатов импедансной аудиометрии для произвольной тимпанограммы пациента с диагнозом отит представленными в [6] был проведен регрессионный анализ тимпанограмм типа С. Вычислялись среднее значение коэффициента корреляции для внутрибарабанного давления (Т) и среднеквадратическое отклонение (СКОт).

Результаты расчета значений коэффициента корреляции на примере тимпанограмм, соответствующих диагнозу отит, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения коэффициента корреляции на примере тимпанограмм типа С		
Область внутрибарабанного давления	Т	СКОт
Полная область: – 400; +400 даПа	–0,35	0,12
Отрицательная область: – 400; 0 даПа	–0,41	0,11
Положительная область: 0; +400 даПа	0,48	0,15

Результаты сравнительного анализа полученных данных по оценке силы корреляционной связи тональных аудиограмм и

тимпанограмм, соответствующих нарушениям звуковосприятия и звукопроводимости при отите, представленные в таблице 1 и таблице 2, соответственно, позволяют сделать вывод о том, что в качестве значащего признака силы связи можно учитывать знак коэффициента корреляции для рассматриваемых случаев отклонения от нормы. Результаты сравнительного анализа могут быть дополнены установлением силы корреляционной связи для косно-воздушного интервала. Для количественной оценки силы корреляционной связи тональных аудиограмм и тимпанограмм необходимо увеличить объем выборки исходных данных. Полученные результаты показали возможность применения данных расчетов в корреляционной адаптометрии, что позволит при проведении профилактических осмотров определять без большого объема вычислений наличие отита, а также другие заболевания.

Библиографический список

1. Таварткиладзе Г.А. Современное состояние и тенденции развития экспериментальной и клинической аудиологии // Вестник оториноларингологии: Медицинский научно-практический журнал. — 2003. — N 6 . — С. 3–6.
2. Кочкин Р. В. Импедансная аудиометрия. – М.: Медицина. - 2006. – 48 с.
3. Бондаренко Р.П., Кириченко И.И., Черноморченко С.Г. Применение регрессионного анализа данных в аудиометрии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – №9(110). – С.199–200.
4. Юнкеров В.И., Григорьев С.Г. Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований. – СПб.: ВМедА. - 2002. – 266с.
5. Коломийченко А.И, Шейнман Н.С. Атлас тональных аудиометрических исследований. Киев: Госмедиздат УССР. – 1962. – 292с.
6. Джафек Б.У., Старк Э.К. Секреты оториноларингологии. Пер. с англ. М. – СПб.: БИНОМ – Невский диалект, 2001. – 624с.

Кириченко Игорь Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Кириченко Инна Игоревна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Кумова Дарья Михайловна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Kirichenko Igor A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, postgraduate student, associate professor.

Kirichenko Inna I. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, postgraduate student.

Kumova Darya M. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”,

Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of electrohydroacoustics and medical engineering, undergraduate student.

УДК 616-01.09

М.В. Лагута, Н.Н. Чернов
Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

К ВОПРОСУ О БЕЗОПАСНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ИНТРОСКОПИИ

Медицинская статистика говорит о некоторых изменениях при воздействии ультразвука на ткани человеческого мозга, центральной нервной системы и репродуктивных органов. Снижение вредного воздействия ультразвука возможно путем понижения его интенсивности или частоты, однако, при этом наблюдается уменьшение глубины проникновения или разрешающей способности.

В работе предлагается использование в качестве зондирующих импульсов широкополосные сигналы, которые позволяют снизить интенсивность ультразвука на ткани без потерь качества интроскопии.

Ключевые слова: *Ультразвуковая интроскопия, интенсивность, влияние ультразвука на человека, разрешающая способность.*

Medical statistics says that some of the changes under the influence of ultrasound on the tissues of the human brain, the Central nervous system and during pregnancy. Finding ways to reduce the harmful impact of ultrasound by lowering its intensity and traditionally limited the penetration depth and resolution.

It is proposed the use of probe pulses of broadband signals that reduce the intensity of ultrasound on tissue without loss of rendering quality.

Key words: *Uultrasound introscopy, intensity, effect of ultrasound on human, resolution.*

Ультразвуковые методы интроскопии широко используются для визуализации внутренних структур организма человека, так как являются более доступными и безопасными по сравнению с рентгеном и магнитно-резонансной томографией. Однако проводимые учеными исследования, посвященные изучению воздействия ультразвука на организм человека, показали наличие вредных воздействий и изменений в организме человека.

Учеными Дальневосточного федерального университета проводились исследования, показавшие наличие изменений в работе различных систем организма человека при облучении диагностическим ультразвуком [1]. Съем параметров организма проводился при помощи высокочувствительного аппарата «Магнитоэнцефалограф индукционный МЭГИ-01» [1].

При облучении сердца помимо данных МЭГИ-01 у каждого испытуемого снималась ЭКГ до и после УЗИ. Получены предварительные данные по достоверному расширению QT интервала, что говорит об уменьшении интервала расслабления миокарда и, следовательно, снижении функциональных возможностей сердца [1].

Максимальная реакция частотных ячеек функциональных состояний, регистрируемых на аппарате МЭГИ-01, наблюдалась через 20 мин после экспозиции ультразвуком. У отдельных лиц раздражение органа наблюдалось на протяжении 3–4 дней. Такая длительная задержка очага повышенной активности в центральной нервной системе характерна для развития выраженных дисфункций или патологических состояний с изменениями в структуре органа [1].

Таким образом, УЗИ-исследование однозначно раздражает интерорецепторы (висцеральные рецепторы) внутренних органов, оставляя значительный и продолжительный след в проекционных центрах коры головного мозга и подкорковых образованиях у практически здоровых людей [1].

Проведенные исследования показали, что воздействие ультразвука оказывает вредное влияние на плод на различных стадиях эмбрионального развития. Мощное ультразвуковое воздействие на биологическую среду может носить деструктивный характер, это необходимо учитывать [2].

Исследования, проведенные на различных эмбриологических моделях, показали наличие очевидных отклонений в развитии, явно индуцированных ультразвуком [3].

Также исследования показали, что влияние УЗИ на ранних сроках беременности (5–12 недель) оказывает разрушительное воздействие на клетки плаценты матери. Абсолютная вероятность такого исхода составляет 5 %. Ультразвуковое обследование при сроке беременности 8 – 10 недель негативно влияет на клетки кожи плода, таким образом, вероятность выкидыша к 12 неделям – 25 % [3].

Безусловно, самый большой вред на плод ультразвуковое воздействие оказывает на той стадии, когда тело еще не сформировалось. Но при этом мы не можем исключить, что ребёнок переживает неприятные эмоции. Часто на практике врачи наблюдают, как во время ультразвукового исследования ребёнок ручкой «отталкивает» датчик аппарата или ручками закрывает себе уши [4]. Также за последние 20 лет отмечен рост количества детей больных аутизмом [4].

Основная задача проведенных исследований заключается в поиске путей снижения интенсивности воздействия ультразвука, при этом должна сохраняться информативность.

Практическую реализацию использование широкополосных сигналов нашло в гидроакустике при профилировании донных отложений и заиленных объектов, что позволяет говорить о возможности применения данных сигналов для медицинской визуализации.

Библиографический список

1. В.И. Короченцев, В.Т. Коваль, Г.А. Шабанов, А.А. Рыбченко, А.И. Волков, И.В. Гарасев. Проблемы исследования

эффектов воздействия ультразвукового излучения на организм человека. Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел III. Акустические методы и приборы в медико-биологической практике. – Ростов-на-Дону.: Изд-во ЮФУ, 2012.

2. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

3. Литовченко Л.П., Хижняк Г.И. О вредном влиянии ультразвукового исследования на плод. Международный журнал экспериментального образования. № 3 за 2015 год (часть 1) [Электронный ресурс].
URL: http://www.rae.ru/meo/?section=content&op=show_article&article_id=6688.

4. Левин В.М. Еще к вопросу о вреде УЗИ. [Электронный ресурс]. URL: http://dobroweb.ru/secrets/1124.

Лагута Маргарита Владимировна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП),; e-mail: margaritalaguta@mail.ru, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Laguta Margarita Vladimarovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: margaritalaguta@mail.ru; 44, Nekrasovsky,

Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, postgraduate student.

Chernov Nicolay Nicolaevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 534.7

М.В. Лагута, Н.Н. Чернов
Научный руководитель: д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Н.Н. Чернов

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ИНТРОСКОПИИ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗДЕСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Рассмотрены вопросы применения широкополосных сигналов в излучающем тракте интроскопа с целью уменьшения вредного воздействия ультразвуковых колебаний, применяемых для визуализации внутренних структур человека, путем уменьшения интенсивности воздействия ультразвука.

Рассмотрены особенности применения широкополосных сигналов в различных системах.

Ключевые слова: *Ультразвуковая интроскопия, интенсивность воздействия, широкополосный сигнал, разрешающая способность.*

The methods or decrease disaster influence of ultrasound wave for visualization income structure of human organism are considered. One of the ways of decrease intensive of diagnostic ultrasound is using wideband signal.

Specialties of using wideband ultrasound signal are considered.

Key words: *Ultrasound introscopy, intensity of the impact, wideband signal, resolution.*

Ультразвуковая интроскопия является одним из самых доступных и распространённых методов визуализации тканей организма человека.

В системах УЗ диагностики устройством, обеспечивающим излучение и прием акустических сигналов, а также формирующим направленные акустические пучки, является ультразвуковой преобразователь (УЗП).

Использование широкополосных сигналов нашло широкое применение в гидролокации, акустических системах контроля качества, дефектоскопии.

В гидролокации это связано как с увеличением дальности действия и повешением разрешающей способности по дальности и угловым координатам, так и с возможностями одновременного определения дальности и радиальной скорости целей [1].

В дефектоскопии широкое применение таких сигналов обусловлено возможностью увеличения глубины зондирования, улучшения разрешающей способности, а также уменьшения габаритов УЗ датчиков с целью создания малогабаритных и переносных УЗ дефектоскопов одностороннего контроля [1].

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования широкополосных сигналов в методах медицинской ультразвуковой интроскопии из-за возможности увеличить разрешающую способность и повысить чувствительность при уменьшении интенсивности сигнала.

Широкополосными (сложными, шумоподобными) сигналами (ШПС) называют такие сигналы, у которых произведения активной ширины спектра F на длительность T много больше единицы. Это произведение называется базой сигнала B, для таких сигналов

$$B = FT >> 1, \qquad (1)$$

Обычно используют широкополосные линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы. Эти сигналы отличаются от

обычных радиоимпульсов тем, что их высокочастотное заполнение имеет переменную частоту [2].

На рис. 1 представлен вид сигнала.

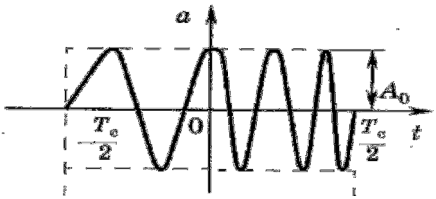


Рисунок 1 – Линейно-частотно модулированный сигнал

На рис. 2 представлен спектр ЛЧМ-сигнала.

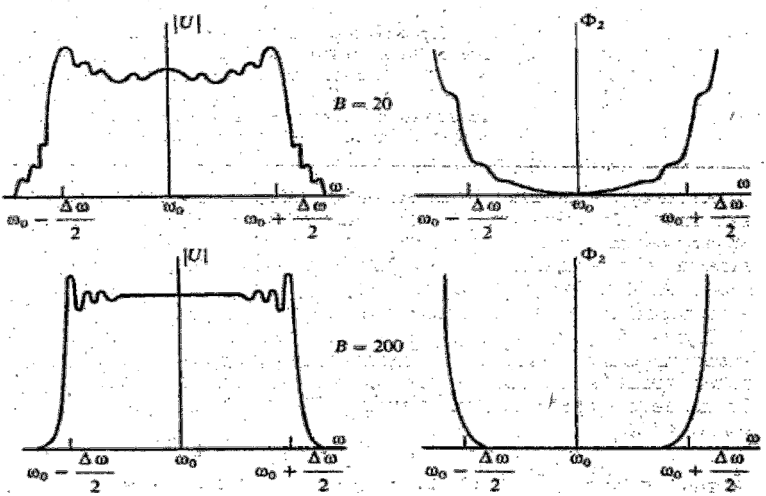


Рисунок 2 – Спектр ЛЧМ-сигнала

Использование широкополосных датчиков улучшает качество изображения, линейное и контрастное разрешение у пациентов с повышенным весом [3].

В последнее время наблюдается тенденция к увеличению рабочих частот и расширению полосы пропускания пьезопреобразователей для медицинской диагностики. Необходимость

в разработке широкополосных ультразвуковых преобразователей связана с возможностью повышения точности измерения акустических параметров исследуемой среды в широком диапазоне частот без смены преобразователя [3].

Библиографический список

1. Ж.Ю. Бондарева, Д.А. Кравчук. Применение широкополосных сигналов в гидроакустических системах связи в мультиагентной системе мониторинга морского шельфа. Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на-Дону.:Изд-во ЮФУ, 2013 г.
2. В.М. Черницер, А.П. Морозов, А.М. Гаврилов, Р.О. Ситников. Акустические сигналы и методы их обработки. – Таганрог.: Изд-во ЮФУ, 2010.
3. С.А. Найда, А.В. Коржик, Т.Н. Желяскова. Статистические методы оптимизации параметров широкополосного пьезопреобразователя для медицинской диагностики. Информационных технологий в медицине.

Лагута Маргарита Владимировна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП),; e-mail: margaritalaguta@mail.ru, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Чернов Николай Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра Электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Laguta Margarita Vladimarovna - Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern

Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: margaritalaguta@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, postgraduate student.

Chernov Nicolay Nicolaevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc.; professor.

УДК 621.3721.54; 534.222

Д.А. Чоп, М.Е. Мищукова, В.А. Обыденная,
Ж.Д. Бондарева
Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ
П.П. Пивнев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ

В данной работе приводится описание характеристик параметрических антенн, разрабатываемых в Южном федеральном университете на кафедре Электрогидроакустики и медицинской техники и предназначенных для наблюдения подводной обстановки с использованием необитаемых аппаратов. Приводится пример одновременного использования совокупности разрабатываемых параметрических антенн в многофункциональной гидроакустической системе, предназначенной для картографических, промерных, навигационных и поисковых целей.

Ключевые слова: *Необитаемый аппарат, параметрическая антенна, добротность пьезоэлектрического элемента, подводное наблюдение.*

The description of the characteristics of the parametrical antennas developed at the Southern federal university on department of College of Electronics and Electronic equipment engineering and intended for supervision of an underwater situation with use of uninhabited devices is provided in this work. The example of simultaneous use of set of the developed parametrical antennas in the multipurpose hydroacoustics system intended for the cartographical, pro-measured, navigation and search purposes is given.

Key words: *Uninhabited device, parametrical antenna, good quality of a piezoelectric element, underwater supervision.*

Для визуализации подводной обстановки с применением автономных подводных аппаратов используются главным образом оптические и акустические средства. Оптические средства визуализации благодаря существенно более короткой длине волны обеспечивают наибольшее разрешение. Однако вследствие значительного поглощения света дальность действия оптических средств освещения даже в чистой воде не превышает десятков метров, а в мутной воде, характерной для условий проведения подводно-технических работ, а также для большинства внутренних водоёмов, она не превышает метра. В этом случае практически единственную возможность для получения информации о подводной обстановке предоставляют гидроакустические средства благодаря существенно меньшему затуханию звука в воде.

Очевидным требованием к гидроакустическим средствам визуализации, кроме высокой дальности действия, является обеспечение высокой разрешающей способности, определяемой как размерами элемента разрешения, так и числом этих элементов. Стремление одновременно уменьшить массогабаритные характеристики гидролокатора и повысить его разрешающую способность неизбежно приводит к необходимости повышения рабочей частоты. Однако повышение рабочей частоты сдерживается ростом коэффициента поглощения звука и, соответственно, дальности действия гидролокатора [1]. Таким образом, существует прямая связь между дальностью действия гидролокатора и оптимальной рабочей частотой, и, следовательно, размерами антенны.

В зависимости от решаемой задачи освещения подводной обстановки для установки на подводные аппараты могут быть востребованы все известные типы гидролокаторов: многолучевые эхолоты для картирования дна, поиска объектов на дне и в водной толще; гидролокаторы бокового обзора для поиска объектов на дне в широкой полосе обзора; интерферометрический гидролокатор – для площадной съёмки рельефа дна; гидролокаторы секторного обзора – для обеспечения навигационной безопасности и поиска объектов по курсу движения подводного аппарата; профилограф отлично подойдет для сканирования толщи дна даже в зонах заиливания. Это далеко не весь список гидроакустической аппаратуры, которая может быть установлена в АНПА.

Для решения актуальных задач на шельфе моря, связанных с исследованием и анализом донных структур, с целью поиска полезных ископаемых, определения структуры дна, оценки накоплений во внутренних водоемах для определения перспективности добычи при производстве органических удобрений, оценки иловых загрязнений для экологического контроля, наиболее оптимально применение параметрического профилографа [2]. Общим принципиальным достоинством параметрических узколучевых профилографов является то, что один и тот же участок среды в пределах узкого луча, одинакового на всех частотах, озвучивается с большим пространственным разрешением, обеспечивая достоверное измерение параметров.

Для наглядности в качестве примера приведены результаты расчета импедансных характеристик параметрической антенны, набранной из разночастотных преобразователей, в виде сектора. Механическая связь по полю преобразователей моделируется изменением их добротности. Рассчитывалась частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления антенны, состоящей из связанных резонансных разночастотных преобразователей [3]. Для определенности в расчетах использовался диапазон частот с центральной частотой 30 кГц. Предполагалось, что антенна состоит из пяти отдельных пьезокерамических элементов с резонансными частотами, различающимися на 3 кГц. То есть: 24, 27, 30, 33 и 36 кГц,

а активная составляющая полного сопротивления каждого пьезокерамического элемента на резонансе равна 200 Ом.

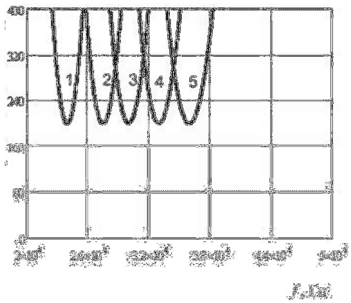
Активная составляющая полной проводимости $G(\omega)$ пьезоэлектрического элемента на частоте ω определяется по формуле:

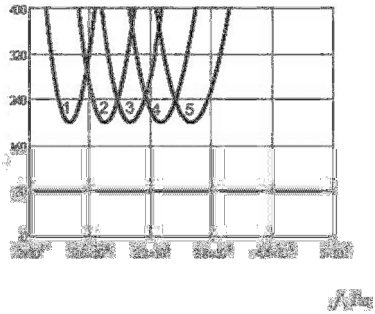
$$G(\omega) = \frac{1}{R_W(1+\nu^2(\omega)Q_M^2)}, \qquad (1)$$

где: R_w – активная составляющая полного сопротивления пьезокерамического элемента на резонансной частоте ω_p; $Q_м$ – механическая добротность сопротивления пьезокерамического элемента; ν – частотная расстройка:

$$\nu = (\frac{\omega}{\omega_h} - \frac{\omega_p}{\omega}). \qquad (2)$$

На рис. 1а показаны рассчитанные резонансные кривые активной составляющей полного сопротивления пьезокерамических элементов с разночастотными частотами 24, 27, 30, 33 и 36 кГц и добротностью $Q_м$ = 8, а на рис. 1б – кривые с теме же резонансными частотами и добротностью $Q_м$ = 5.





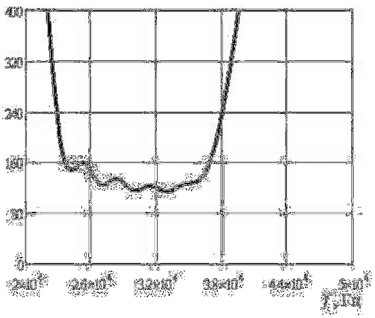
а) добротность $Q_м$ = 8. б) добротность $Q_м$ = 5.

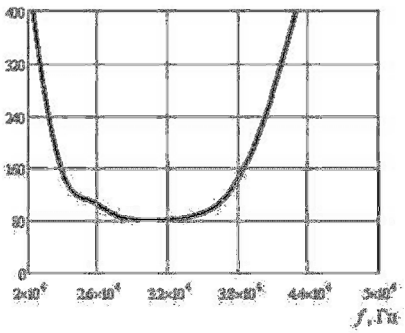
Рисунок 1 – Рассчитанные резонансные кривые активной составляющей полного сопротивления преобразователей антенны: кривая 1– 24 кГц, кривая 2 – 27 кГц, кривая 3 – 30 кГц, кривая 4 – 33 кГц и кривая 5 – 36 кГц.

Сравнение кривых на рисунках показывает расширение частотной полосы при уменьшении добротности каждого пьезоэлектрического элемента.

Поскольку разночастотные преобразователи в антенне включаются параллельно, то активная составляющая полного сопротивления связанных резонансных преобразователей будет учитывать каждую составляющую полного сопротивления преобразователей, тем самым уменьшая общее сопротивление.

На рис. 2 показана резонансная кривая активного сопротивления связанных резонансных преобразователей, состоящих из разночастотных пьезокерамических элементов с резонансными частотами 24, 27, 30, 33 и 36 кГц с добротностью $Q_м$ = 8 (рис. 2а) и с добротностью $Q_м$ = 5 (рис. 2б).





а) добротность $Q_м$ = 8. б) добротность $Q_м$ = 5.

Рисунок 2 – Резонансные кривые активного сопротивления антенны, состоящей из разночастотных пьезокерамических элементов с частотами 24, 27, 30, 33 и 36 кГц.

Полоса пропускания такой антенны равна 14,5 кГц. Из рис. 2б видно, что при уменьшении добротности каждого пьезокерамического элемента ширина полосы частот активной составляющей полного сопротивления антенны увеличивается.

Для дальнейшего расширения полосы частот антенны можно либо увеличить количество разночастотных пьезокерамических элементов, либо расширить диапазон частот между резонансными

частотами отдельных пьезоэлектрических элементов с одновременным уменьшением добротности. Увеличим расстояние по частотной оси между элементами до 3,5 кГц, т.е. выберем следующий ряд резонансных частот пьезоэлектрических элементов: 24; 27,5; 31; 34,5 и 38 кГц. Рассчитаем резонансную кривую для преобразователя с такими резонансными частотами пьезоэлектрических элементов и добротностью $Q_м$, равной 5.

На рис. 3 приведена рассчитанная резонансная кривая активного сопротивления антенны, состоящей из разночастотных пьезокерамических элементов с приведенными выше резонансными частотами и добротностью $Q_м = 5$.

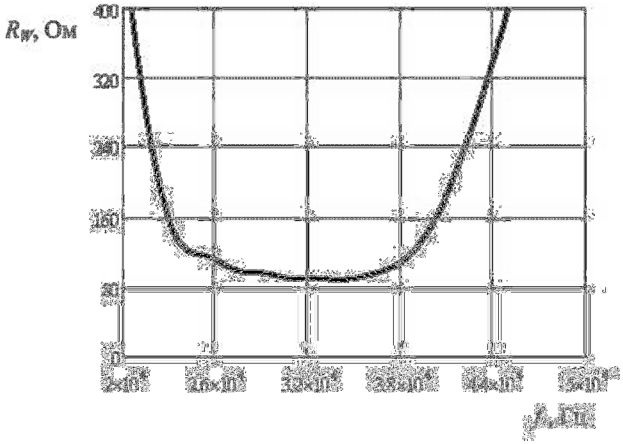


Рисунок 3 – Резонансная кривая активного сопротивления антенны, состоящей из разночастотных пьезокерамических элементов с частотами 24; 27,5; 31; 34,5 и 38 кГц, $Q_м = 5$.

Из приведенной частотной зависимости активного сопротивления видно, что ширина полосы частот антенны увеличилась до 19,0 кГц.

Таким образом, изменяя расстояние между частотами резонанса отдельных преобразователей и их добротность, можно построить эффективную широкополосную антенну. При этом, антенна

остается по существу резонансной с достаточно высоким коэффициентом полезного действия.

Одним из преимуществ такого способа создания широкополосных излучающих гидроакустических антенн является возможность сохранения примерно одинаковой направленности антенны во всем диапазоне частот. Поскольку в процессе активного излучения одновременно участвует ограниченное количество пьезоэлектрических преобразователей, их волновые размеры могут быть подобраны примерно одинаковыми, и, соответственно, ширина характеристики направленности на всех частотах будет почти одинаковой.

Поскольку для антенн гидроакустической передачи информации обычно требуются достаточно широкие характеристики направленности, рассмотрим формирование характеристик направленности антенн системы передачи широкополосной информации с учетом этой особенности.

Библиографический список

1. Разработка. Подводные аппараты. Электронный ресурс: http://www.cta.ru/cms/f/441553.pdf : Дата обращения 10.12.2014;
2. В.В. Котляров П.П. Пивнев Г.В. Солдатов И.В. Перенижко, Применение параметрического профилографа для профилирования донных структур на шельфе моря. Сборник трудов Научной конференции "Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества". Т.2. – М.: ГЕОС, 2012, 359 с.;
3. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.;
4. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.

Чоп Дмитрий Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий,

электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail dmitriy.chop@mail.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Мищукова Мария Евгеньевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail mash_TGN@mail.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Обыденная Валентина Андреевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail vaobydennaya@mail.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Бондарева Жанна Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail jeanne_bond@mail.ru., кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Chop Dmitriy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: dmitriy.chop@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student.

Mishchukova Maria E. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: mash_TGN@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

ObydennayaValentina A.– Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: vaobydennaya@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

Bondareva Jeanne Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: jeanne_bond@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

УДК 53.072.13

В.Ю. Нерук, Д.А. Давыдов, Э.В. Гончар
Научный руководитель – д.т.н., профессор кафедры ЭГА и МТ Тимошенко В.И.

ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ, ИНТЕНСИВНОСТИ И ИНЕРЦИОННОСТИ ЗВУКА В ТРУБЕ РИЙКЕ

Изучено явление пороговости, интенсивности и инерционности звука в трубе Рийке. Модифицирована лабораторная установка по изучению генерации звука (эффекта Рийке). Получены качественные параметры стенда и занесены в таблицу.

Ключевые слова: *Труба Рийке, генерация звука, лабораторная работа, порог звучания.*

The phenomenon of a threshold , intensity and persistence of sound in a Rijke tube. Modified laboratory facility for the study of sound generation (Rijke effect). Qualitative parameters stand izaneseny in the table.

Key words: *Rijke tube, sound generation, laboratory work, the threshold of sound.*

Аэротемическая генерация звука в трубе Рийке относится к нелинейным явлениям акустики. Для решения соответственной задачи используется лабораторный стенд, установленный на кафедре ЭГА и МТ [1]. Поставленная нами цель – изучить порог генерации, интенсивность и инерционность явления. Исследований такого типа ранее не проводились. Для получения количественных характеристик порога мы предложили дополнить экспериментальную установку проградуированной заслонкой, меняющей конвекционный аэропоток, образующийся от нагретой спирали. Именно этот поток определяет положительную обратную связь в аэротермическом генераторе звука трубы Рийке [2]. Модернизацию лабораторного стенда вы можете видеть на рис.1

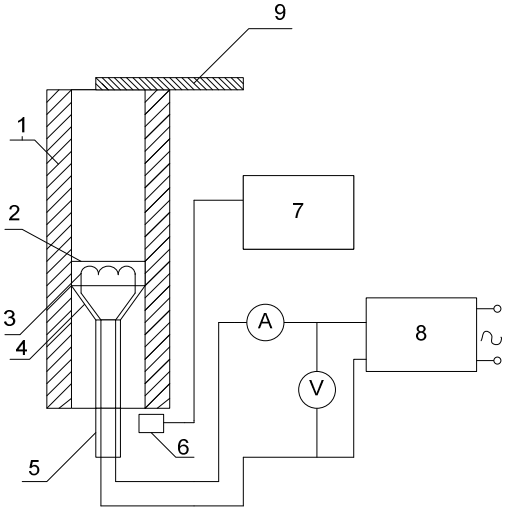


Рисунок 1 – Модернизированный стенд аэротермического генератора: 1 – кварцевая труба; 2 – нагреватель; 3 – нихромовая спираль; 4 – центрирующая спираль; 5 – держатель; 6 – микрофон; 7 – осциллограф; 8 – генератор; 9 – крышка с заслонкой

Результат нашего эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица1.

Зависимость громкости звучания трубы от площади отверстия.

Площадь отверстия, %	Наличие звука
100	Максимальная громкость
52	Порог генерации звука
30	Звука нет
0	Звука нет

Порог генерации звука напрямую зависит от площади отверстия трубы. Также зависит от мощности, но в нашем исследовании она постоянна и равна 90 Вт. При данном пороге было проведено исследование усиления звука в трубе Рийке.

Библиографический список

1. Тимошенко В.И. «Исследование аэротермического усиления звука в трубах», Акустические исследования АНСССР, том XVII, выпуск 4, 1971.
2. Бородин Ю.И., Тимошенко В.И. «Об эффекте аэротермического усиления звука в трубах», труды ТРТИ, выпуск 25, Прикладная акустика, том IV, 1971.

Давыдов Даниил Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: d.davydov505@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Нерук Валерий Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: walerik1995@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Гончар Эдуард Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: edo.gonchar@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент 3-го курса.

Davydov Daniil A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: d.davydov505@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

Neruk Valery Y. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: walerik1995@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

Gonchar Eduard V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: edo.gonchar@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, student of 3-d course.

Neruk Valery Y. – Department of Electrohydroacoustics and Medical Engineering, Institute of Nanotechnologies, electronics, and

Equipment Engineering, Southern Federal University. E-mail: E-mail: walerik1995@gmail.com. 347928 Rostov region, Taganrog, GSP 17A per.Nekrasovsky, 44, Bldg. E., student EPbo3-7.

Davydov Daniil A. – Department of Electrohydroacoustics and Medical Engineering, Institute of Nanotechnologies, electronics, and Equipment Engineering, Southern Federal University. E-mail: d.davydov505@gmail.com. 347928 Rostov region, Taganrog, GSP 17A per.Nekrasovsky, 44, Bldg. E, student EPmo3-7.

Gonchar Eduard V. – Department of Electrohydroacoustics and Medical Engineering, Institute of Nanotechnologies, electronics, and Equipment Engineering, Southern Federal University. E-mail: edo.gounchar@yandex.ru. 347928 Rostov region, Taganrog, GSP 17A per.Nekrasovsky, 44, Bldg. E, student EPbo3-7.

УДК 621.3721.54; 534.222

С.П. Тарасов, П.П. Пивнев, В.А. Воронин,
М.Е. Мищукова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХЫХ АППАРАТОВ

Целью данной работы является решение задач в области экологического, геологоразведческого и инженерного мониторинга объектов, находящихся под водой за счет использования автономных необитаемых подводных аппаратов и систем. В общем контексте рассмотрены характеристики широкополосных параметрических гидроакустических антенн, принцип действия которых основан на использовании эффекта нелинейного взаимодействия акустических волн. Приводятся результаты экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик широкополосных параметрических антенн.

Ключевые слова: Автономный необитаемый подводный аппарат, робототехника, параметрическая антенна, широкополосные сигналы, нелинейное взаимодействие.

The aim of this work is to solve problems in environmental, engineering exploration and monitoring of objects under water through the use of Autonomous unmanned underwater vehicles and systems. In the overall context of the characteristics of broadband parametric sonar antennas, whose operation is based on using the effect of nonlinear interaction of acoustic waves. The results of experimental research of amplitude-frequency characteristics of the broadband parametric antennas.

Key words: Autonomous underwater vehicle, robotics, parametric antenna, broadband signals nonlinear interaction.

Современные самоходные АНПА представляют собой отдельный класс робототехнических объектов с присущими им задачами, особенностями технологии, составом систем и функциональными свойствами. При всем разнообразии самоходных АНПА (по целевому назначению, массогабаритным характеристикам, конструктивному облику, типу энергосиловой установки, диапазону рабочих глубин и т.п.) общепризнанной классификации в этом классе робототехники еще не сложилось. Обзор отечественных и зарубежных публикаций в области подводной техники [1] позволил сформулировать наиболее общее и непротиворечивое условное деление самоходных АНПА (рис. 1).

АНПА представляет собой систему, которая может включать в себя гидролокатор бокового обзора (ГБО), профилографы, параметрические антенны и мн. др.

Наиболее эффективными при выполнении аварийно-спасательных, инженерно-технических и научно-исследовательских работ являются АНПА.

Надо отметить, что модульный принцип построения современных аппаратов привел к стиранию граней между их целевым назначением. Практически все современные разработки конструкций АНПА являются многоцелевыми.

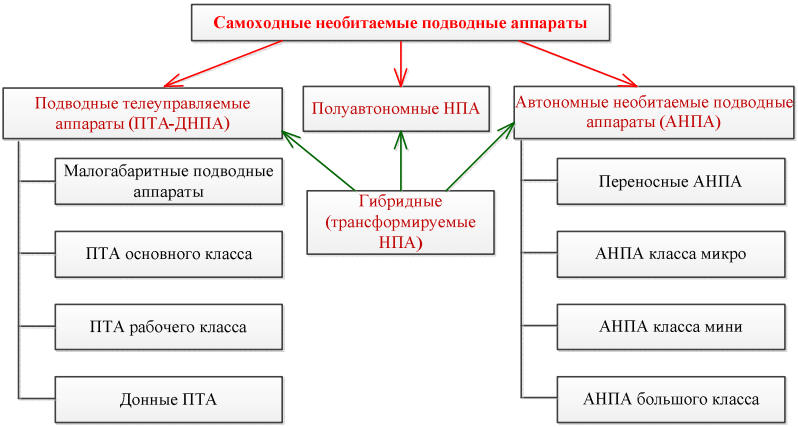


Рисунок 1 – Условная классификация НПА

Со всеми АНПА необходима устойчивая связь. Для передачи данных от АНПА к обеспечивающему судну может быть использован только гидроакустический канал. Для передачи больших объемов информации необходимо использовать широкополосные системы. В качестве широкополосных систем передачи данных предлагается использовать системы с параметрическими излучающими антеннами, широкополосность которых обусловлена самой природой явления. Амплитудно-частотная характеристика параметрической антенны определяется эффективностью процесса нелинейного взаимодействия волн накачки в звуковом пучке на различных частотах. Величина акустического давления пропорциональна значению разностной частоты в степени 1,5 – 1,8 [2,3].

На рис. 2 представлены теоретические (кривая 1) и экспериментально полученные (кривая 2) амплитудно-частотные характеристики параметрической антенны с частотами накачки в диапазоне 300 кГц. Зависимости построены для расстояния 5 м от преобразователя накачки. Амплитуда звукового давления представлена в децибелах относительно 1 Па. Эффективность процесса нелинейного взаимодействия возрастает с увеличением разностной частоты. Некоторое несоответствие экспериментальных

результатов теоретическим уровням звукового давления на частотах более 15 кГц вызвано уменьшением звукового давления по частотам накачки вследствие узкой полосы пропускания одночастотного преобразователя накачки. Общая амплитудно-частотная характеристика параметрической антенны зависит не только от амплитудно-частотной характеристики нелинейного взаимодействия, но и от амплитудно-частотной характеристики преобразователя накачки.

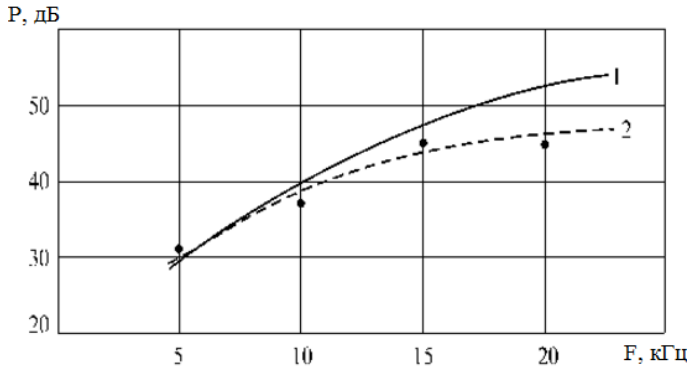


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика параметрической антенны с частотами накачки в диапазоне 300 кГц (1- расчет, 2-эксперимент)

Экспериментально измеренные амплитудно-частотные характеристики широкополосных параметрических антенн гидролокаторов ПГЛ-3 (кривая 1) и ПГЛ-5 (кривая 2) в диапазонах рабочих частот представлены на рис. 3. Зависимости построены для уровней звукового давления, приведенных к расстоянию 1 м.

Как показывают результаты исследований, диапазон разностных частот, излучаемых параметрической антенной, ограничен снизу, в основном, уменьшением эффективности нелинейного преобразования энергии волн накачки в волну разностной частоты при большом соотношении частот накачки и разностной. Сверху диапазон ограничен полосой пропускания антенны накачки.

Расширения диапазона разностных частот удается достичь применением двухрезонансной антенны накачки, особенно, если соотношение частот накачки и разностных частот мало.

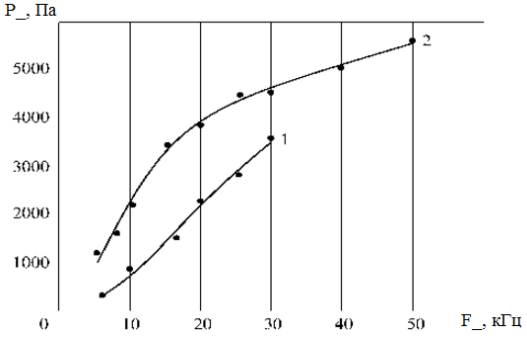


Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики параметрических антенн гидролокаторов ПГЛ-3 (кривая 1) и ПГЛ-5 (кривая 2)

Одной из наиболее важных характеристик параметрической антенны является характеристика направленности. Именно благодаря высокой направленности на низких частотах, постоянной в широком диапазоне разностных частот, и отсутствию боковых лепестков в диаграмме направленности параметрические антенны находят широкое применение во многих областях гидролокации.

С целью получения более высокого уровня звукового давления на разностной частоте стремятся использовать двухрезонансные антенны накачки мозаичной конструкции. Антенная решетка состоит из двух подрешеток, набранных из элементов с разными резонансными частотами. Подрешетки вставлены друг в друга так, что элементы располагаются в порядке чередования типов с разными частотами. В этом случае эффективно используются двухканальные схемы формирования сигналов накачки. Расположение отдельных элементов такой антенной решетки должно обеспечивать эффективное взаимодействие волн накачки.

Одним из способов создания сигнала с пространственно-частотной зависимостью может быть излучение линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с девиацией частоты F, длительностью Ts и прямоугольной огибающей [4-5]:

$$S_n(t) = \begin{cases} A_o \cos[\Omega_o t + \pi B (t / T_s)^2], & |t| \le T_s / 2, \\ 0 & |t| > T_s / 2, \end{cases}$$

и одновременное плавное сканирование параметрического луча в пространстве таким образом, чтобы в каждом угловом направлении Q, излучался сигнал с разностной частотой Ws :

$$\Omega_s = \Omega_0 \left(1 - \frac{\pi F}{\Omega_0} \cdot \frac{\Theta}{\Theta_m} \right), \qquad |\Theta| \le \Theta_m.$$

где B = F·Ts – база пространственно-частотного сигнала.

Использование в гидролокационных системах в качестве зондирующих импульсов пространственно-частотных сигналов приведет к тому, что эхо-сигналы, приходящие из разных направлений, будут иметь свою среднюю частоту, происходит как бы “частотное окрашивание” пространства, что даст возможность с высоким разрешением локализовать подводный объект при большой производительности поиска.

Постоянство характеристики направленности антенн в широком диапазоне частот крайне важно для многих гидроакустических систем, устанавливаемых на подводных аппаратах, в частности для гидролокатора бокового обзора. В этом случае размеры обследуемой площади или объема среды, остаются одинаковыми на всех частотах.

В этом состоит одно из важных преимуществ рассмотренных способов создания широкополосных антенн гидроакустических систем подводного наблюдения и связи для оснащения подводных аппаратов.

Библиографический список

1. Пивнев П.П., Бондарева Ж.Ю., Обыденная В.А. Экспериментальные исследования повышения информативности гидролокационных средств самоходных подводных аппаратов путем расширения полосы пропускания. Электронный журнал Scientific World, Технические науки, 2014 г.;

2. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.;

3. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.;

4. Борисов С.А., Тарасов С.П., Филатов К.В. Излучение пространственно частотных сигналов с помощью параметрических антенн / Межвуз. сб. Теория электрических цепей и сигналов. - Таганрог: ТРТУ, 1994.;

5. Филатов К.В. Анализ авто- и взаимокорреляционных свойств пространственно-частотных сигналов. Тезисы докладов Всесоюзной НТК “Теория и техника пространственно-временной обработки сигналов”, Свердловск, 1989.- С. 74-75.

Тарасов Сергей Павлович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95,

кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, к.т.н., доцент.

Воронин Василий Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н., профессор.

Мищукова Мария Евгеньевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail mash_TGN@mail.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Tarasov Sergey P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc., professor.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Voronin Vasiliy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Doctor of Engineering Sciences, Professor.

Mishchukova Maria E. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: mash_TGN@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

УДК 534.22

К.С. Онищенко, А.В. Данников,
П.П. Пивнев, Д.А. Кравчук

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭКСКУРСОВОД ДЛЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МУЗЕЕВ

Целью данной работы является разработка параметрической антенны для практического использования в музеях, картинных галереях и т.д., для воспроизведения звуковой информации перед отдельными экспонатами на ограниченной площади. Суть изобретения – использование двух лучей ультразвуковых волн постоянной амплитуды, направленных таким образом, чтобы область пересечения этих лучей образовалась в том месте, где необходимо воспроизвести звуковую информацию, причем один из лучей фазомодулированным звуковым сигналом с помощью фазосдвигающих цепей.

Ключевые слова: *переносной аудиогид, стремечко, базилярная мембрана, волосковые нервные клетки, бигармонический сигнал*

The purpose of this work is to develop a parametric antenna for practical use in museums, art galleries, etc., for reproducing the audio information to the individual exhibits in a limited area. The essence of the invention using two beams of ultrasonic waves of constant amplitude, direction so that the area of intersection of the beams formed in the place where it is necessary to reproduce the audio information, one of the beams being phase-modulated audio signal by using the phase-shifting circuits.

Key words: *portable audio guide stirrup, basilar membrane, hair nerve cells biharmonic signal.*

Структура устройства, благодаря которому создаются нелинейные эффекты внутри человеческого уха, и высокая направленность акустической системы, показана на рис. 1.

Каждый раз, когда к контрольной точке (экспонат или переход из одной секции в другую) подходит посетитель, срабатывает датчик движения (ДД).

Датчик постоянно опрашивается микроконтроллером (МК) на случай обнаружения объекта, которым является человек. В тот момент, когда ДД отвечает положительно, МК обращается к запоминающему устройству (ЗУ), и начинает извлекать из него записанные данные об экспонате или маршруте следования. Эти данные представляют собой цифровую запись акустического сигнала.

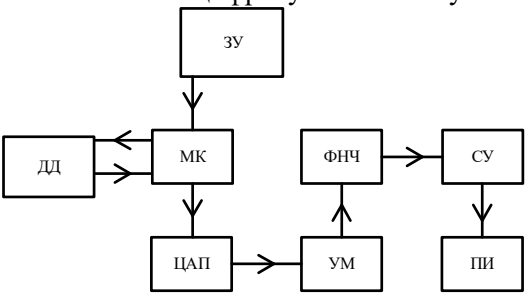


Рисунок 1 – Структурная схема электронного экскурсовода

Для приведения записанных данных в форму, воспринимаемую человеком, сигнал необходимо подвергнуть преобразованию, получить из цифрового вида аналоговый, для этого в устройстве используются цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и фильтр нижних частот (ФНЧ). ЦАП преобразует цифровой сигнал к виду амплитудно-импульсного (АИМ), после чего АИМ восстанавливается до аналоговой формы посредством (ФНЧ).

Стоит отметить, что перед тем, как сигнал поступит на ФНЧ, он обладает малым уровнем, которого недостаточно для воспроизведения звука. Эта проблема решается путем добавления в схему усилителя мощности (УМ).

Аббревиатура СУ на структурной схеме обозначает согласующее устройство, которое необходимо для корректной работы устройства при взаимодействии электрической и механической части.

Механическая часть представлена параметрическим излучателем (ПИ). Параметрический излучатель составляют из набора высокочастотных громкоговорителей.

Слуховой аппарат состоит из трех отделов – внешнее, среднее и внутреннее ухо. Экспериментально доказано, что преобразование сигнала во внешнем и среднем ухе – процесс линейный, основная причина нелинейности – в механизме работы внутреннего уха (улитки). Улитка состоит из трех полостей, в которых находится жидкость (рис. 2). При ударе стремечка по мембране овального окна в жидкости возникает звуковой импульс, который распространяется из верхнего отдела в нижний и возбуждает базилярную мембрану, что при высоких уровнях сигнала в жидкости улитки образуются вихревые потоки. Поскольку ширина полостей разная, то этот процесс похож на образование околодонных завихрений, когда вода ударяется о берег (рис. 3а и рис. 3б). Появление этих завихрений искажает форму звукового импульса, а поскольку базилярная мембрана выполняет его спектральный анализ, то эти искажения и приводят к появлению дополнительных гармоник и комбинационных тонов.

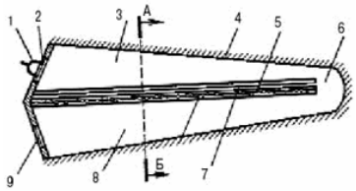
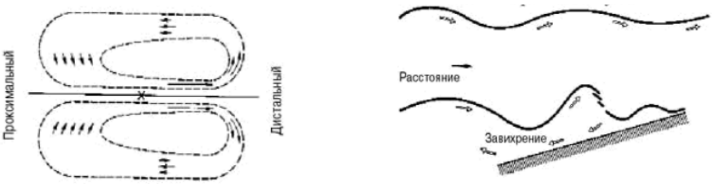


Рисунок – 2 Структура улитки 1 – сремечко, 2 – овальное окно, 3 – вестибулярный ход, 4 – костная оболочка, 5 орган Карти, 6 – отверстие, 7 – базиллярная мембрана, 8 – нижняя полость, 9 – круглое окно

Рассмотрим вторую причину нелинейности. На базилярной мембране механические смещения мембраны передаются органу Корти, коллекции специальных нервных клеток, называемых волосковыми, расположенных рядами вдоль базилярной мембраны, часть этих клеток называется внутренними (ВВК), их порядка 4000, другая часть - наружными (НВК), их около 12000 (рис. 4).



а) б)

Рисунок – 3 а) Вихревые токи в улитке, б) Завихрения в воде вследствие удара о поверхности

Именно эти наружные волосяные клетки и играют основную роль в нелинейной компрессии звука. При больших уровнях сигнала они удлиняются и, тем самым, как бы придерживают смещения базилярной мембраны, предохраняя внутренние волосковые клетки от слишком большого изгиба, а на малых уровнях сигнала они усиливают смещения, как бы "подкачивая" энергию базилярной мембране.

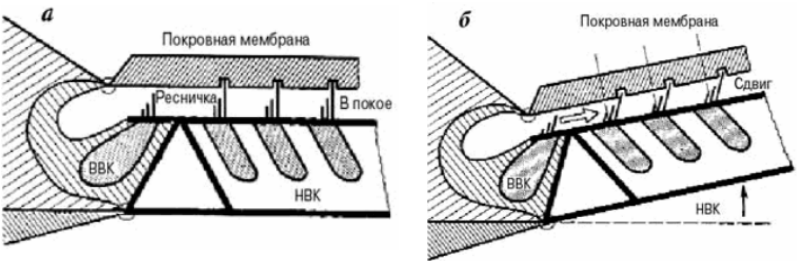


Рисунок – 4 Внутренних и наружных волосковых клеток

Параметрическая антенна предназначалась для создания инфразвуковых частот в воздухе при использовании двух точно направленных источников акустических волн, имеющих частоты звукового диапазона или выше. Такой метод получения инфразвуковых колебаний представляется наиболее оптимальным, так как длина волны инфразвуковых колебаний представляется наиболее оптимальным, так как длина волны инфразвуковых волн очень велика, и использовавшиеся источники инфразвуковых волн имели круговые диаграммы направленности, что делает опыты с инфразвуком

трудным. Использование же двух направленных источников, обладающих частотой колебаний выше инфразвуковой и не оказывающих вредного физического и нейрофизиологического воздействия на человека, но в площади своего пересечения, складываясь друг с другом или вычитаясь, дают инфразвук.

Принцип действия излучающей параметрической антенны можно пояснить следующим образом. В простейшем случае параметрический излучатель (ПИ) представляет собой первичный преобразователь, генерирующий высокочастотные волны накачки (рис.5) и участок среды, протяженностью L_3. Волной накачки чаще всего служит бигармонический сигнал с близкими звуковыми или ультразвуковыми частотами f_1 и f_2. Интенсивность первичных волн должна быть достаточной для того, чтобы сделать среду нелинейной. При взаимодействии первичных волн накачки в нелинейной среде и их распространении появляются волны с новыми частотами, которых не было в спектре первичного излучения.

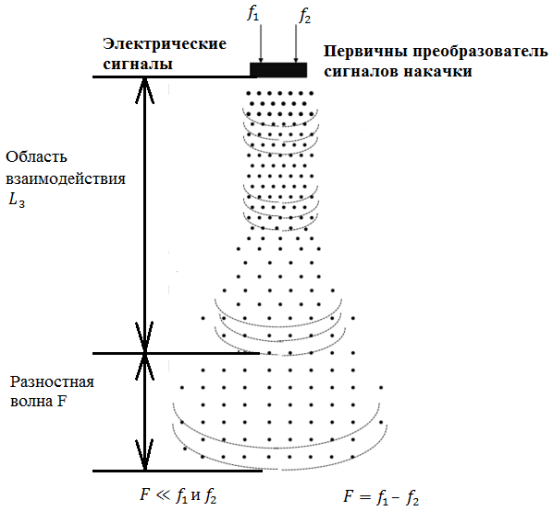


Рисунок – 5 Схема нелинейной параметрической излучающей антенны

Частоты вторичных волн легко определить, возводя в квадрат функцию, описывающую исходный бигармонический сигнал.

$$p' = p_{01} \cdot SIN(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + p_{02} \cdot SIN(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t),$$

где p_{01} и p_{02} – константы – амплитуды волн давления;

j – фаза;

t – время;

Видно, что в среде происходит нелинейный процесс генерации вторых гармоник $2f_1$ и $2f_2$, а также волн суммарной $f_1 + f_2$ и разностной $F = f_1 + f_2$ частот. Из-за квадратичной частотной зависимости вязкого поглощения волны f_1, f_2, $2f_1$, $2f_2$, $f_1 + f_2$ затухают гораздо раньше, чем волна разности частоты (ВРЧ). Поэтому за пределами области взаимодействия первичных волн, ограниченной длиной их затухания L_3, может существовать лишь разностная волна F. Сама же область взаимодействия, в которой распределены нелинейные источники ВРЧ, выполняет роль антенны, излучающей разностные сигнал F.

Уникальным свойством ПИ является то, что источники ВРЧ в области взаимодействия не являются покоящимися, они возникают при нелинейном взаимодействии волн накачки и движутся вместе с ними со скоростью звука c_0. Также в ПИ практически полностью отсутствуют боковые лепестки в диаграмме направленности.

На форму диаграммы направленности оказывает влияние и поперечное распределение амплитуд ВЧ–волн на преобразователе. Пример характеристик направленности первичного и вторичного излучений ПИ приведен на рис.6. Первичные волны обладают частотами 418 (а) и 482 кГц (б), при диаметре излучателя 2а = 7,5 см. Вторичная волна ¾ частотой 64кГц (в).

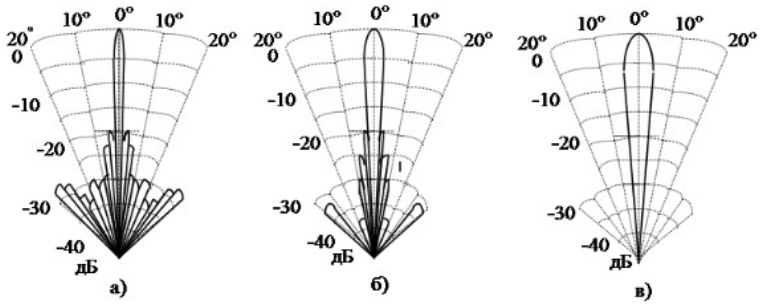


Рисунок – 6 Характеристики направленности первичного (а, б) и вторичного (в) излучений

Таким образом, использование параметрических антенн для практического использования в музеях и картинных галереях по многим параметрам является самым эффективным из уже известных средств. Уникальная особенность параметрических антенн формировать свое поле в заданной области позволяет воспроизводить звуковую информацию перед отдельными экспонатами на ограниченной площади. Данное устройство очень удобно тем, что оно непрерывно воспроизводит звуковую информацию об объекте и, в тоже время, звуковая информация от соседнего объекта не создает помех для слушателей.

Библиографический список

1. Организация цифровых каналов звукового вещания // М. ЗУПАРОВ лекции по курсу «Радиовещание" Ташкент 2004 г.- стр 65;
2. О.В. Руденко, С.И. Солуян. Теоретические основы нелинейной акустике, Изд-во: Москва, 1975 г.;
3. Электронный ресурс: http://vunivere.ru/work6291 // Параметрическая антенна. Дата обращения: 09.12.2015.

Онищенко Кирилл Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: griffin-92@inbox.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Данников Артём Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: Dav.91@list.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru;

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Кравчук Денис Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: denik545@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Onishchenko Kirill S. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: griffin-92@inbox.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

Dannikov Artem V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: Dav.91@list.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

Pivnev Peter P.– Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: pivnev@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, associate professor.

Kravchuk Denis A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; e-mail: denik545@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, associate professor.

УДК 621.3721.54; 534.222

П.П. Пивнев, Г.В. Солдатов, А.А. Лукьянченко, Д.А. Чоп, Д.О. Безматерных, В.А. Обыденная

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДВОДНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Профилограф предназначен для поиска и обнаружения придонных и заиленных объектов, стратификации донных отложений, определения типа грунта и может применяться при производстве археологических изысканий, геологических и других видов работ на шельфе как самостоятельно, так и в составе многофункциональных гидроакустических комплексов. В работе приведены результаты гидроакустического мониторинга, снятые с использованием параметрического профилографа в районе мыса Панагия Таманского полуострова на акватории Черного моря.

Ключевые слова: *Параметрический профилограф, акустический комплекс, параметрический гидролокатор, археологическое исследование.*

Profilograf is intended for search and detection of the benthonic and silted objects, stratification of ground deposits, definition like soil and can be applied by production of archaeological researches, geological and other types of works on the shelf as is independent, and as a part of multipurpose hydroacoustic complexes. The results of hydroacoustic monitoring removed with use of a parametrical profilograf near the cape Panagia of Taman Peninsula on the water area of the Black Sea are given in work.

Key words: *Parametrical profilograf, acoustic complex, parametrical sonar, archaeological research.*

Морская археология зародилась в начале 20-го века. Первое использование тяжелого водолазного оборудования затрудняло работы, водолаз совершал свои действия медленно, не мог быстро передвигаться и исследования продвигались с огромным трудом. Но с изобретением акваланга подводная археология получила новый толчок. Аквалангист, облаченный в легкий костюм с баллонами, был

абсолютно свободен в своих движениях и мог буквально парить над дном, быстро передвигаясь в любом направлении, имел отличный обзор во все стороны, опускаясь для совершения действий и также быстро поднимаясь на поверхность. Именно аквалангистами были найдены самые известные и значительные находки.

Однако объекты, находящиеся под водой, через некоторое время зарастают донной растительностью, ракушками и визуально начинают походить на обычные природные объекты, лежащие на морском дне – скалы, груды валунов и т.д.

Здесь на помощь человеку снова приходит нелинейная гидроакустика.

Использование профилографического акустического оборудования позволяет получить не только изображение поверхности морского дна, но и его срез, или профиль, на десятки метров в толщу поверхности.

В августе 2015 года сотрудники и студенты кафедры Электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ с разработанными на кафедре приборами приняли участие в Таманской подводной археологической экспедиции Русского Географического общества по обнаружению древних портовых сооружений и останков кораблей в районе мыса Панагия Таманского полуострова на акватории Черного моря (руководитель экспедиции Кравченко Дмитрий Федорович, действительный член РГО).

Мыс Панагия расположен на юго-западе Таманского полуострова и омывается водами Черного моря и представляет собой риф, высотой около 30 метров над уровнем моря, который построили обитатели древнего тёплого моря. Он полностью состоит из их окаменелых останков. Море постепенно отвоевывает свою территорию у суши, захватывая примерно один метр берега в год. На это указывают ряд высоких и узких скал, растянувшийся среди моря на полтора километра, геологическое строение морского дна и берега.

Для решения ряда специфических задач гидроакустики целесообразно использование параметрических излучающих антенн, принцип действия которых основан на нелинейном взаимодействии акустических волн при распространении. Применение параметрических антенн в гидроакустической аппаратуре позволяет за счет их широкополосности, высокой направленности, низкого уровня

бокового поля существенно увеличить отношение сигнал/помеха в сложной помеховой обстановке, повысить информативность и точность при обнаружении и определении координат подводных объектов, получить дополнительные признаки для распознавания.

В статье представлены результаты гидроакустического обследования дна и придонного грунта в районе мыса Панагия Таманского полуострова на акватории Черного моря с использованием параметрического гидролокатора.

Параметрический профилограф за счет узкого безлепесткового луча на низких частотах позволяет обнаружить объекты в грунте до его глубин 10–50 м и поэтому может применяться для определения положения подгрунтовой части сооружений, поиска малоразмерных предметов (например, амфор, якорей и др.), заиленных в грунте.

Профилирование донных слоев с высоким разрешением требует особого подхода к выбору параметров аппаратуры, таких как характеристика направленности, разрешающая способность по угловым координатам и по дальности и др. Принципиальным является необходимость использования высоконаправленных систем для получения высокого разрешения, так как в противном случае эхо-сигналы от донных слоев будут маскироваться более сильными отражениями от дна, обусловленными краем широкой характеристики направленности антенны. Для обеспечения высокого разрешения по дальности и угловым координатам стараются использовать сравнительно высокочастотные зондирующие сигналы, но для того, чтобы обеспечить проникновение звука в грунт, необходимо использование низких частот. Кроме того, в характеристике направленности необходим малый уровень боковых лепестков, так как сигналы, рассеянные дном в направлении боковых лепестков, могут быть опознаны как слои в грунте.

Эхограммы, полученные с помощью ПГЛ, приведены на рис. 1 и 2. В настоящей работе проведен анализ некоторых из полученных записей.

На рис. 1 приведен типовой профиль донных осадочных структур в прибрежной части района мыса Панагия. На эхограмме видны слои, образуемые пластами голубой глины.

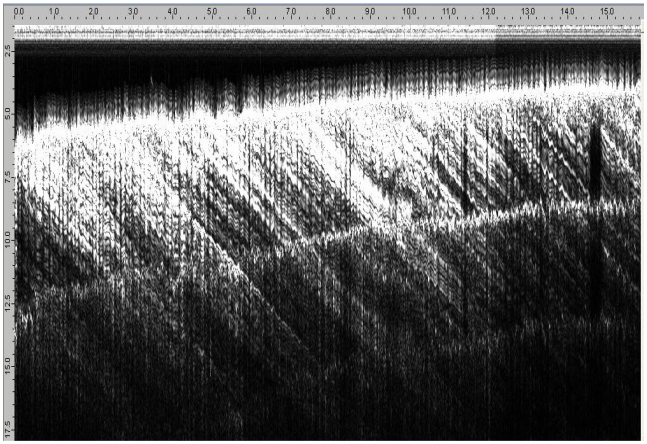


Рисунок 1 – Акустическая запись ПГЛ
(36°37'19.39"E,45°08'56.38"N 36°37'15.90"E,45°09'9.76"N)

Сравнительный анализ эхограмм, полученных с помощью ПГЛ, позволяет получить целостную информацию о строении морского дна и проводить поиск объектов, расположенных не только в толще водоема и на морском дне, а также объектов погруженных в слой донных осадков.

Рассмотрим структуру донного грунта. На рис. 2 приведена эхограмма.

На рис. 2 виден карман, сложенный осадочными породами донного грунта. Подобная структура донного грунта говорит о возможном расположении русла древней реки на месте кармана.

На рис. 2 приведена эхограмма, полученная ГБО, на которой виден объект на дне, частично занесенный грунтом. Форма объекта напоминает лодку. Видны нос и корма с характерным возвышением над корпусом.

На профилограмме отчетливо видна слоистая структура придонного грунта с плавно изменяющими направление слоями, что говорит о возможном выходе в этом районе много сотен лет назад русла реки.

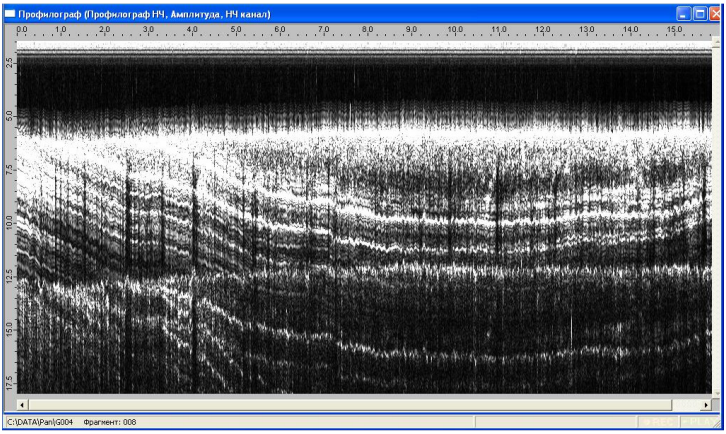


Рисунок 2 – Акустическая запись ПГЛ
(ПГЛ,36°37'6.11"E,45°09'9.30"N 36°37'12.45"E,45°08'53.23"N)

В результате поисковой работы была получена своеобразная карта морского дна в виде панорамы поверхности дна и вертикальных разрезов донного грунта. Полученные данные позволяют оценить структуру, тип, состав донных осадков, определить их вертикальную и горизонтальную изменчивость, обнаружить объекты на дне и в придонных слоях.

В работе экспедиции использовались разработанные на кафедре гидролокатор бокового обзора и параметрический профилограф. С помощью этого оборудования были сделаны уникальные снимки морского дна с различными объектами. На снимках видны интереснейшие вещи: вот параллельные друг другу образования, структура которых напоминает кладку. Вот россыпь одинаковых предметов круглой формы. Вот длинная ровная трещина, а перпендикулярно ей еще несколько тоже ровных и прямых. Видны даже объекты, отчетливо напоминающие плавсредства, – лодки или корабли. К сожалению, аквалангистам все осмотреть по ряду причин не удалось, но результаты работы оборудования однозначны. Мы можем фотографировать поверхность дна и анализировать снимки. Аквалангисты, тем не менее, нашли кое-что интересное – прямоугольный блок каменного угля. В древности его использовали вовсе не для отопления, а как декоративный отделочный материал. Уголь добывали на территории современного Донбасса и кораблями везли в метрополию, где использовали для отделки храмов. Пролив из

Азовского в Черное море довольно беспокойный в плане погоды и течений, поэтому корабли с грузом зачастую гибли в этом районе. Такой корабль был обнаружен на дне экспедицией в 80-х годах. То есть корабль с грузом угля лежит совсем неподалеку, именно из него высыпался груз угля и в том числе, этот самый обломок. Течение не могло унести тяжелый кусок угля далеко от места падения на дно. К сожалению, обнаружить корабль в этот раз не удалось, но его поиск есть в планах дальнейшей работы, как и поиски остатков поселения и античных портовых сооружений. Также, в планах разработка новых методов и приборов для площадного исследования дна, совмещение разных функций в одном устройстве для универсализации работы и экономии времени и места на судне, детальное исследование морского дна Кавказского побережья Черного моря под руководством Русского Географического общества, проверка новых устройств в реальных рабочих условиях, испытание их для поиска не только археологических объектов, но и полезных ископаемых. По результатам испытаний новая техника будет представлена ведущим отечественным предприятиям и научно-исследовательским институтам, занимающимся подводными работами и исследованиями. Необходимо разработать планы масштабных исследований во всех морях, прилегающих к России, наладить взаимодействие со всеми заинтересованными лицами и организациями, вынести это на утверждение руководства страны. Именно Россия должна стать мировым лидером по исследованию Мирового океана и у нас есть все необходимое для этого: и необходимая теоретическая база для разработки новейших принципов, и опытно-конструкторское предприятие для создания испытательных образцов, и опытные профессора, и молодые специалисты, готовые разрабатывать, создавать, исследовать. Осталось только наладить все необходимые связи и разработать план перспективных работ.

Библиографический список

1. Воронин В.А, Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. / Ростов н/Д: Ростиздат, 2004. 400 с.;

2. Воронин В.А., Воронин А.В., Пивнев П.П. К вопросу контроля положения подводных и заиленных частей опор мостов. //

Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2006-море и человек» / Матер. науч.-техн. конф. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006, №12. с.86;

3. В.А. Воронин, С.П. Тарасов, В.В. Котляров, П.П. Пивнев, Н.Н. Свинобаев Экологический мониторинг опор мостов с использованием средств гидроакустики. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 1 (78). С. 94–96;

4. Пивнев П.П. Применение модульного принципа построения гидроакустических систем, предназначенных для экологического мониторинга морской среды. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9 (146). С. 134–140;

5. Максимов В.Н., Воронин В.А., Тарасов С.П., Пивнев П.П. Акустический тракт гидролокатора бокового обзора. Патент на полезную модель RUS 105470 11.02.2011;

6. Электронный ресурс: http://www.rostovgid.ru/nature/island /mis-panagiya.html. Дата обращения: 5.06.2015.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Солдатов Геннадий Валерьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: g.soldatov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Лукьянченко Анатолий Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: lukyanchenko_a@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Чоп Дмитрий Андреевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: dmitriy.chop@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Безматерных Дмитрий Олегович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: dmitriybezm@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, магистрант.

Обыденная Валентина Андреевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: vaobydennaya@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Soldatov Gennadiy V.– Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: g.soldatov@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, assistant.

Lukyanchenko Anatoly A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation,

e-mail: lukyanchenko_a@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, student.

Chop Dmitriy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: dmitriybezm@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, student.

Bezmaternykh Dmitriy O. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: dmitriybezm@gmail.com, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

ObydennayaValentina A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: vaobydennaya@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, undergraduate student.

УДК 534.22

С.П. Тарасов, П.П. Пивнев, В.А. Воронин

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГИДРОЛОКАТОР-ПРОФИЛОГРАФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ДНА

Целью данной работы является проектирование низкочастотного параметрического гидролокатора-профилографа для исследования тонкой геологической структуры морского и речного дна. В статье представлены результаты расчетов геометрических размеров и основных характеристик антенны и отдельных преобразователей. В заключении приведен анализ результатов экспериментальных исследований модулей антенны.

Ключевые слова: *Параметрический гидролокатор-профилограф, характеристика направленности, широкополосное излучение.*

The aim of this work is the design of low-frequency parametrical sonar-Profiler for the research of fine geological structure of sea and river bottom. The article presents the results of calculations of geometrical sizes and main characteristics of the antennas and the separate converters. In conclusion, the results of experimental research of antenna modules.

Key words: *parametric sonar-profiler, directional, broadband emission.*

Задачи изучения структуры придонных слоев эффективно решаются с помощью низкочастотной гидроакустической и сейсмоакустической техники. В настоящее время для этого все чаще находят применение параметрические гидролокаторы–профилографы. Использование в режиме излучения параметрической антенны позволяет применять широкополосное излучение на низких (глубоко проникающих в грунт) частотах при сравнительно небольших размерах антенны. Конструкция параметрического прибора и основные параметры антенны накачки с учетом массогабаритных и технологических показателей определяются назначением и условиями эксплуатации [1,2]. Ширину характеристики направленности антенны на частотах накачки определяют из условий обеспечения необходимого энергетического потенциала параметрического профилографа и требуемого разрешения в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учетом электронной компенсации качки судна.

Результаты расчетов геометрических размеров антенны и отдельных преобразователей, представленные в [3], послужили основой для разработки конструкции антенны накачки низкочастотного параметрического профилографа. В состав антенны накачки параметрического гидролокатора-профилографа с центральной частотой накачки 30 кГц входит 800 пьезоэлементов с излучающей поверхностью 80х8 мм. Зазоры между излучающими поверхностями преобразователей составляют 5 мм и 2 мм. Разностные

(рабочие) частоты антенны (0,2–50) кГц при постоянной характеристике направленности 3х3 градуса. При этом размеры антенны 0,8х1,2 м. Конструктивной особенностью антенны является разбиение ее на 10 отдельных модулей, что позволяет повысить ее надежность и упростить технологию производства и установки на судно. Отдельный модуль, показанный на рис. 1, представляет собой двухканальную антенную решетку. Преобразователи в каждом модуле соединены в 20 каналов (10 каналов НЧ и 10 каналов ВЧ), тем самым антенна разбита на 200 каналов (по 100 на каждую частоту накачки), что позволяет электронно стабилизировать луч при качке судна.

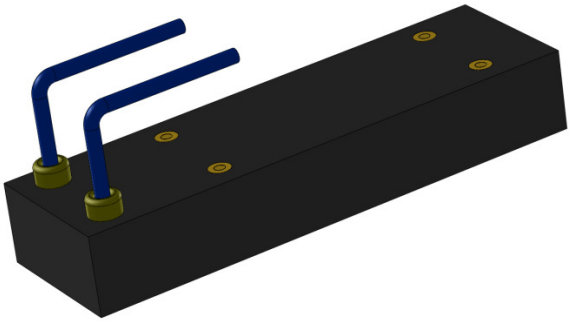


Рисунок 1 – 3D-модель модуля антенны

Излучающий блок представляет собой массив из 40-ка одинаковых пьезокерамических преобразователей. Закрепленные на подложке пьезоэлементы помещены в прямоугольную форму и загерметизированы двухкомпонентным полиуретановым компаундом. Электрическое соединение акустического преобразователя с программным комплексом осуществляется с помощью соединительных кабелей. Антенна накачки представляет собой комплекс, состоящий из десяти одинаковых излучающих блоков, расположенных в два ряда, по 5 шт. в каждом. Основанием для закрепления антенны накачки служит днищевая рама. На рис. 2 представлены 3D-модель и фотография антенны накачки. Предусмотренные в конструкции рамы элементы крепления позволяют устанавливать антенну на забортном устройстве.

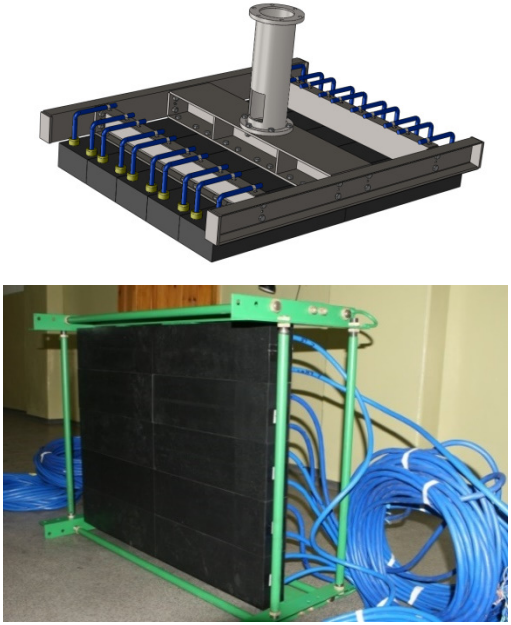
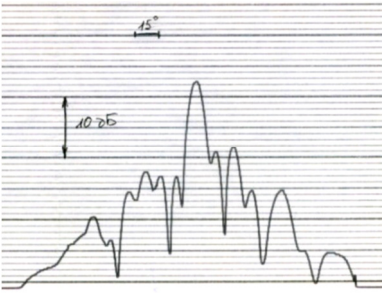
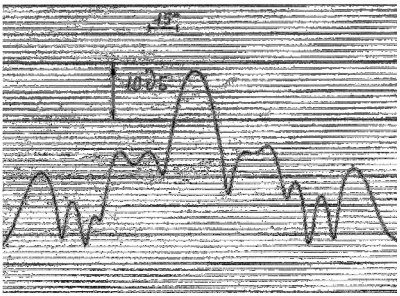


Рисунок 2 – Конструкция антенны накачки параметрического профилографа

В рамках экспериментальных исследований характеристик антенны накачки были проведены лабораторные исследования направленных свойств отдельных модулей антенны в измерительном гидроакустическом бассейне. На рис. 3а и 3б показаны экспериментально измеренные характеристики направленности отдельного модуля антенны в широкой и узкой плоскости, соответственно, а на рис. 4 представлены Rw каналов модуля.





а) б)

Рисунок 3 – Характеристика направленности модуля антенны в широкой а) и узкой б) плоскостях

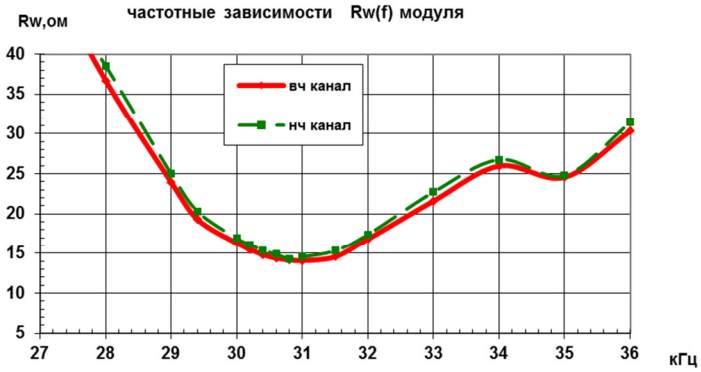


Рисунок 4 – Частотная зависимость Rw каналов модуля

Анализ результатов экспериментальных исследований модулей антенны показал, что учет конструктивных и технологических особенностей акустической аппаратуры позволяет получить идентичные и стабильные характеристики антенны накачки низкочастотного параметрического профилографа в целом.

Библиографический список

1.Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 416 с.;

2.Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры.– Л.: Судостроение, 1986. – 287 с.;

3.Воронин В.А., Тиссенбаум Ю.Л., Усов В.П. Исследование антенны накачки параметрического профилографа / Нелинейные акустические системы.Сборник статей.-Ростов н/Д: ЗАО «Ростиздат». -2008, С.38–49;

4.Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн.– Л.: Судостроение, 1973 ,275 с.

Тарасов Сергей Павлович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Воронин Василий Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н., профессор.

Tarasov Sergey P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia;

phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc., professor.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Voronin Vasiliy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Doctor of Engineering Sciences, Professor.

УДК 534.22

П.П. Пивнев

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

Целью данной работы является исследование нелинейного взаимодействия многокомпонентных акустических сигналов в круглом волноводе на примере взаимодействия компонент 10-ти компонентного сигнала накачки в круглом волноводе с акустически жесткими стенками. В статье представлены результаты исследований зависимость фазовой скорости от частоты и осевые распределения волн разностной частоты для различных диаметров волновода и частоты. В заключении приведен анализ задержек волны накачки и волны разностной частоты.

Ключевые слова: *нелинейное взаимодействие, волны разностной частоты, осевое распределение, круглый волновод, многокомпонентный акустический сигнал.*

The aim of this work is to study the nonlinear interaction of multi-component acoustic signal in a circular waveguide for example, the interaction component 10 component source pumping in a circular waveguide with rigid walls. The article presents the results of research the dependence of phase velocity on frequency and axial distribution of the waves of the difference frequency for various diameters of the waveguide and frequency. In conclusion, the analysis of the delays of the pump wave and the wave difference frequency.

Key words: *nonlinear interaction, the waves of the difference frequency, axial distribution, round waveguide, multi-component acoustic signal.*

Рассмотрим случай взаимодействия компонент 10-ти компонентного сигнала накачки в круглом волноводе с акустически жесткими стенками.

Зависимость фазовой скорости звука от частоты для круглого волновода с акустически жесткими стенками находится по формуле [1] :

$$c(f) = c_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{кр}}}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \right]^{-1/2}, \qquad (1)$$

где $f_{кр}$ – критическая частота нормальной волны ($f_{\text{кр}} = \dfrac{\alpha_{01} \cdot c_0}{d}$); d – диаметр волновода; c_0 – скорость звука в среде; $\alpha_{01} \approx 1.21$.

В волноводе распространяющиеся волны не испытывают дифракционной расходимости. Следовательно, будем рассматривать задачу взаимодействия волн в волноводе для недифрагирующих гауссовых пучков [2].

В этом случае осевое распределение амплитуды звукового давления m-той компоненты ВРЧ находится по формуле:

$$P_m = \sum_{k=1}^{n-m} i \cdot \frac{\varepsilon \cdot K_m}{2 \cdot c^2 \cdot \rho} \cdot p_k \cdot p_{k+m} \cdot \int_0^z \frac{\exp(-\alpha z(1 - i\Delta D_m))}{\left(1 - i \cdot \dfrac{z - y}{L_{dm}}\right)} dy, \qquad (2)$$

где n – количество компонент;

m – номер компоненты сигнала разностной частоты (m_{max}=n-1);
p_k, p_{k+m} – амплитуды взаимодействующих волн;
$\mathcal{E}$ – нелинейный параметр;
$L_{dm} = \dfrac{a^2 m\Omega}{4c_0}$ – длина зоны дифракции m-вой компоненты ВРЧ.

А вычисление сигнала волны разностной частоты [3-5] можно производить, используя выражение:

$$P_{-} = \sum_{m=1}^{n-m} P_m \ . \qquad (3)$$

В зависимости от размеров трубы и значений частот взаимодействующих волн возможно несколько случаев расположения частот взаимодействующих волн относительно диапазона частот с ярко выраженной дисперсионной характеристикой.

Рассмотрим два случая: частоты накачки лежат в области малой дисперсии, а частоты ВРЧ в области сильной дисперсии; частоты накачки лежат в области сильной дисперсии, а частоты ВРЧ в бездисперсионной области.

Рассмотрим первый случай на примере круглого волновода с акустически жесткими стенками диаметром 1.2 м.

Зависимость фазовой скорости от частоты для этого случая приведена на рис. 1. На этом же рисунке вертикальными линиями обозначены положения компонент частот накачки и разностных частот для диапазона частот накачки (120–147) кГц и диапазона частот ВРЧ (3–27) кГц.

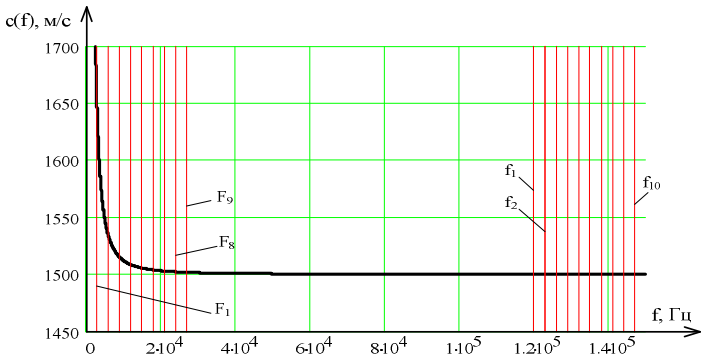


Рисунок 1 – Зависимость фазовой скорости от частоты для волновода диаметром 1,2 метра

Видно, что для различных значений компонент ВРЧ фазовые скорости существенно различаются, а для компонент накачки фазовые скорости различаются незначительно.

Проведем анализ влияния положения компонент на частотной оси на характеристики генерируемого сигнала волн разностной частоты.

При анализе будем наблюдать изменение амплитуды ВРЧ от расстояния. Амплитуду выразим в относительных величинах $P_н$, которые равны отношению в каждой точке по расстоянию амплитуды ВРЧ в среде с дисперсией к максимальному значению амплитуды ВРЧ в среде без дисперсии, а расстояние выразим в длинах зон затухания на средней частоте волн накачки.

На рис. 2 представлено осевое распределение волны разностной частоты, полученное при взаимодействии двух первых компонент сигнала накачки и осевое распределение ВРЧ для бездисперсионного случая для двух первых компонент сигнала накачки. При этом частоты компонент накачки 120 и 123 кГц, а частота разностной частоты F_=3 кГц и осевое распределение ВРЧ, полученные при взаимодействии 9 и 10 компонент сигнала накачки с частотами компонент 144 и 147 кГц при разностной частоте F_=3 кГц.

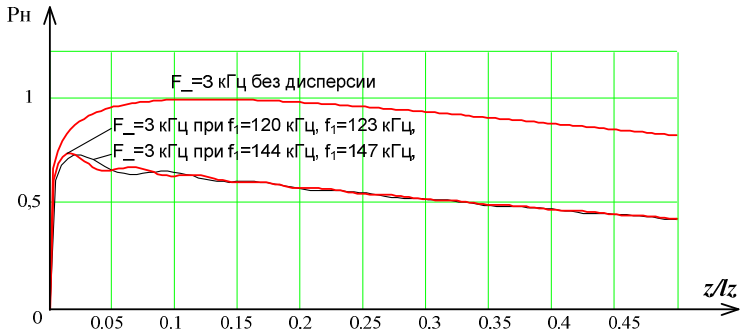


Рисунок 2 – Осевые распределения ВРЧ с частотой 3 кГц

На представленных на рис. 2 осевых распределениях амплитуд звуковых давлений ВРЧ видны осцилляции амплитуд звуковых давлений ВРЧ, которые возникают из-за разности в фазовых скоростях волн накачки и волны разностной частоты. Физически это означает, что перекачка энергии из волн накачки в волны разностной частоты уменьшается из-за разности скоростей распространения, т.е. накопление сигнала ВРЧ (сложение генерируемых в каждой точке пространства волн в фазе) происходит медленнее т.к. фазы генерируемых сигналов в различных точках пространства разные. Периодичность обусловлена периодичностью изменения фазы генерируемых сигналов.

На рис. 2 представлены осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой F_=8 кГц, полученные в результате взаимодействия 1 и 9 компоненты десятикомпонентного сигнала накачки (15–23) кГц, 2 и 10 компонент (16–24) кГц и амплитуда ВРЧ для бездисперсионного случая.

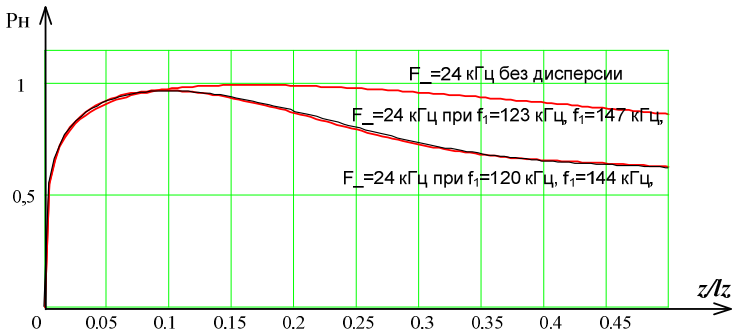


Рисунок 2 – Осевые распределения ВРЧ с частотой 24 кГц

На представленных на рис. 2 осевых распределениях амплитуд звуковых давлений ВРЧ период осцилляций удлинился и амплитуды давлений ВРЧ для случая с дисперсией и бездисперсионого случая сближаются из-за того что фазовая скорость ВРЧ близка к фазовым скоростям волн накачки (рис.1). Осевые распределения не совпадают полностью из-за небольшого различия фазовых скоростей волн накачки.

Для формирования сигнала волн накачки со сложением в фазе волн разностной частоты при взаимодействии различных компонент волн накачки необходимо знать либо фазу сигнала, либо его задержку в конкретной точке относительно какой либо компоненты.

На рис. 3 и 4 представлены задержки компонент сигнала разностной частоты и компонент сигнала накачки, соответственно.

Угол наклона задержек зависит от угла наклона дисперсионной кривой. Задержки между различными компонентами сигнала различны, т.к. зависимость фазовой скорости от частоты нелинейная.

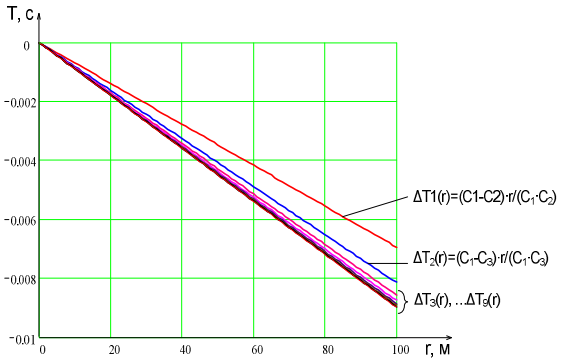


Рисунок 3 – Задержки компонент сигнала ВРЧ

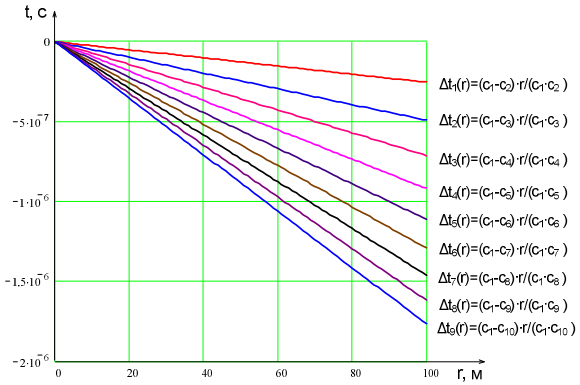


Рисунок 4 – Задержки компонент сигнала накачки

Длительность многокомпонентного сигнала ВРЧ в круглом волноводе в области дисперсии увеличивается из-за разности в фазовых скоростях компонент.

Таким образом, различные компоненты сигнала ВРЧ приходят в точку пространства в различное время, что приводит к изменению формы сигнала.

Если излучить многокомпонентный сигнал с такими задержками, чтобы компоненты сигнала ВРЧ начали распространяться с задержками, представленными на рис. 3, то в точке L, лежащей на оси излучения, компоненты сигнала ВРЧ «догонят» друг друга.

Проанализируем теперь случай, когда компоненты многокомпонентного сигнала накачки лежат в области сильной дисперсии, а компоненты сигнала ВРЧ лежат в бездисперсионной области.

Рассмотрим второй случай на примере круглого волновода с акустически жесткими стенками диаметром 10 см.

Зависимость фазовой скорости от частоты для этого случая приведена на рис. 5. На этом же рисунке вертикальными линиями обозначены положения компонент частот накачки и разностных частот для диапазона частот накачки (30–39) кГц и диапазона частот ВРЧ (1–9) кГц.

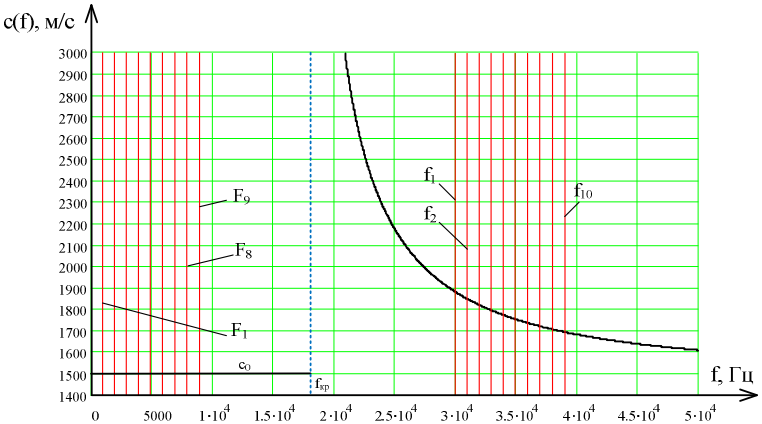


Рисунок 5 – Зависимость фазовой скорости от частоты

На рис. 6 представлены осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой F_=1 кГц для частот волн накачки (30–31) кГц (1 и 2 компонент десятикомпонентного сигнала накачки) и для (38–39) кГц (9 и 10 компонент), и осевое распределение амплитуды давления ВРЧ для бездисперсионного случая.

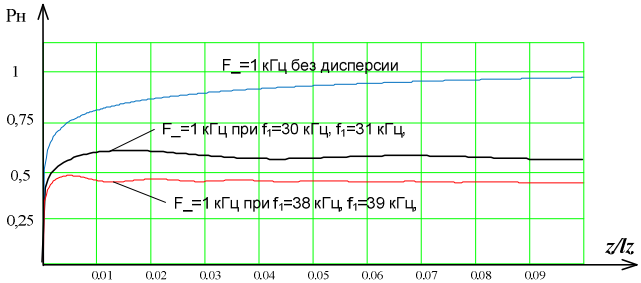


Рисунок 6 – Осевое распределение ВРЧ с частотой 1 кГц

Из рис. 6 видно, что осевые распределения ВРЧ различны для разных волн накачки, но одинаковой разностной частоты.

Амплитуда звукового давления ВРЧ тем меньше, чем больше разница в фазовых скоростях волн накачки. Физически это означает, что перекачка энергии из волн накачки в волны разностной частоты уменьшается из-за разности скоростей распространения, т.е. накопление сигнала ВРЧ (сложение генерируемых в каждой точке пространства волн в фазе) происходит медленнее, т.к. фазы генерируемых сигналов в различных точках пространства разные. Периодичность обусловлена периодичностью изменения фазы генерируемых сигналов.

Осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой ВРЧ F_=8 кГц и частотами накачки волн (30–38) кГц (1 и 9 компоненты сигнала накачки) и (31–39) кГц (2 и 10 компоненты) представлены на рис. 7.

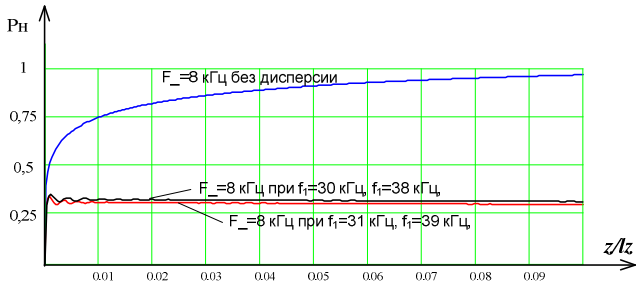


Рисунок 7 – Осевое распределение ВРЧ с частотой 8 кГц

На рис. 8 представлены задержки компонент сигнала накачки.

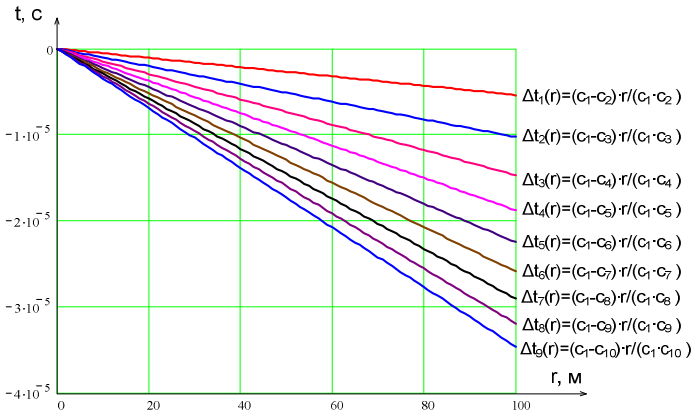


Рисунок 8– Задержки компонент сигнала накачки

Угол наклона задержек зависит от угла наклона дисперсионной кривой. Задержки между различными компонентами сигнала различны, т.к. зависимость фазовой скорости от частоты нелинейная.

Анализ задержек волны накачки и волны разностной частоты показывает, что задержки компонент волны накачки не влияют на задержки компонент волны разностной частоты. Это объясняется тем, что взаимодействие волн происходит только в том случае, когда они существуют одновременно в среде, поэтому смещение одной компоненты относительно другой не имеет существенного влияния.

Библиографический список

1. В.Б. Штейнберг. Распространение звука в круглых трубах произвольного радиуса. // Акустический журнал, 1976г., вып. 3 с. 444–448.
2. П.П. Пивнев. Исследование взаимодействия акустических волн в круглом волноводе. // Труды VII Всероссийской научной конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления», Таганрог, 2004.
3. А.В. Попов. Распространение звука в трубах переменного сечения.// Акустический журнал, 1978г., вып. 6, с. 919–924.

4. В.А. Воронин, В.П. Кузнецов, Б.Г. Мордвинов, С.П. Тарасов, В.И. Тимошенко Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону «РостИздат», 2007.
Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. –Л.: Судостроение, 1981. С. 264.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

УДК 534.22

С.П. Тарасов, В.А. Воронин, П.П. Пивнев, В.В. Котляров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ

Целью данной работы являются экспериментальные исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в мелком море. В статье представлены экспериментальные данные профиля дна на трассе распространения акустических сигналов, профиля скорости звука, вертикального распределения уровня сигнала. В заключении приводится анализ полученных результатов исследований.

Ключевые слова: *нелинейное взаимодействие, вертикальное распределение скорости звука, широкополосный сигнал.*

The aim of this work is experimental study of nonlinear interaction of acoustic waves in shallow sea. The article presents the experimental data of bottom profile on the propagation path of acoustic signals, the profile of the speed of sound, the vertical distribution of the signal level. In conclusion, the analysis of the research results.

Key words: *nonlinear interaction, the vertical distribution of sound speed, wideband signal.*

В статье представлены результаты экспериментального исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в мелком море. В качестве полигона исследований был выбран Таганрогский залив Азовского моря. Было проведено исследование профиля дна по трассе волноводного распространения звука. Результаты измерений приведены на рис. 1. Видно, что глубина по трассе изменялась от 3,5 до 2,3 м. Из полученных результатов измерений профиля дна на трассе был сделан вывод о том, что данная трасса пригодна для проведения натурных исследований волноводного распространения звука.

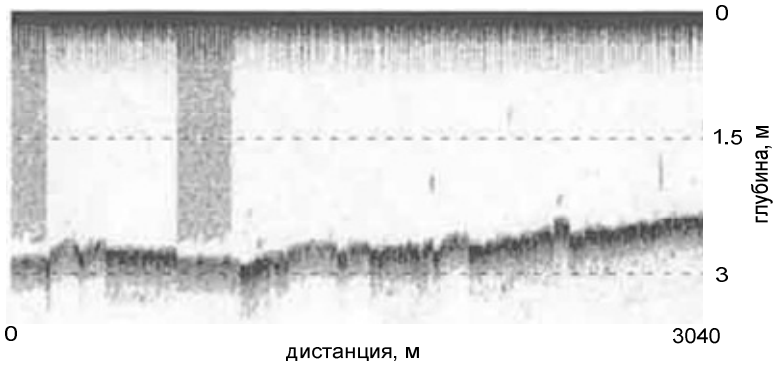


Рисунок 1 – Профиль дна на трассе распространения акустических сигналов

Измерения ВРСЗ проводились в точке излучения и в точках приема-излучения, а также в промежуточной точке трассы. Измерения проводились с дискретностью по глубине 0,25 м. Результаты измерений вертикального распределения скорости звука, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод о равномерном

законе изменения скорости звука, практически постоянном по глубине. На рис. 2 по оси ординат отложена глубина, по оси абсцисс – значения скорости звука.

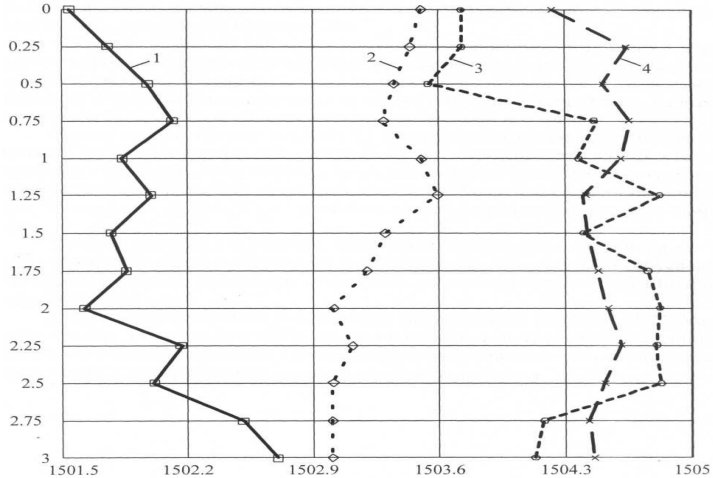


Рисунок 2 – Профили скорости звука: кривая 1 – профиль измерен рядом с излучающей системой; кривая 2 – на расстоянии 284 м от излучающей системы; кривая 3 – на расстоянии 874 м от излучающей системы; кривая 4 – на расстоянии 1590 м от излучающей системы

Представим далее экспериментальные результаты измерений амплитуд давлений по трассе распространения на расстояниях до 3000 м.

Исследовались характеристики распространения импульсов длительностью 2 мс с заполнением, частота которой имела линейную модуляцию в полосе (7–15) кГц, либо была фиксированной. На рис. 3 приведен пример записи сигналов, зарегистрированных на вертикальной цепочке гидрофонов на расстоянии 874 м от излучателя. Несущая частота 13.81 кГц. Видно, что основная энергия излучения концентрируется около поверхности волновода. Это могло быть связано с ветровым сносом верхнего слоя 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

возбуждалась первая мода волновода. На рис. 4 показано вертикальное распределение акустического поля в волноводе на разных дистанциях. Поле практически не осциллирует в вертикальной плоскости, что также указывает на то, что распространение сигнала можно характеризовать как одномодовое с выраженным вкладом первой моды.

Поскольку волновод в нашем случае оказывается однородным и распределение скорости распространения звука в нем практически не зависит от глубины, то условия распространения в нашем случае соответствовали нормальной волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала увеличивается с частотой. Следовательно, для достижения эффекта сжатия широкополосного сигнала при его распространении в волноводе нужно обеспечивать возрастание частоты за время излучения сигнала. Такой режим модуляции и был использован в наших экспериментах.

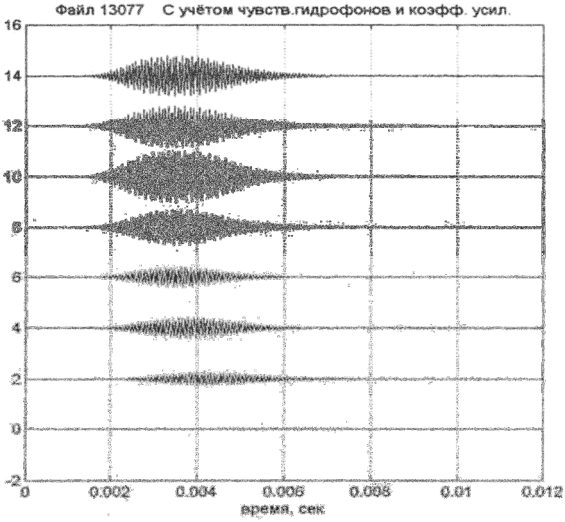


Рисунок 3 – Сигналы, зарегистрированные на вертикальной цепочке гидрофонов. Дистанция 874м от излучателя. Несущая частота 13.81 кГц

Сделанный расчет дисперсии скорости позволяет оценить изменение задержки различных частотных составляющих сигнала

при его распространении в волноводе. На рис. 5 показана зависимость такой задержки для различных дистанций, пройденных сигналом. Как видно, наклон дисперсионной кривой, рассчитанной для дистанции 1590 м, показывает практически полное совпадение с экспериментальным результатом. Некоторое отличие в области низких частот, что соответствует началу сигнала, может объясняться либо переходными процессами, либо особенностью распространения звука на низких частотах, неучтенной нашей моделью. Анализ показывает, что дальнейшая трансформация задержки приходов различных частотных составляющих происходит таким образом, что время прихода низкочастотных и высокочастотных составляющих может совпасть на дистанции приблизительно в 6 км для условий настоящего эксперимента. Опыт показывает, что для достижения полного синхронизма времени прихода всех частотных составляющих сигнала необходима специальная частотная модуляция, соответствующая особенностям дисперсии в волноводе.

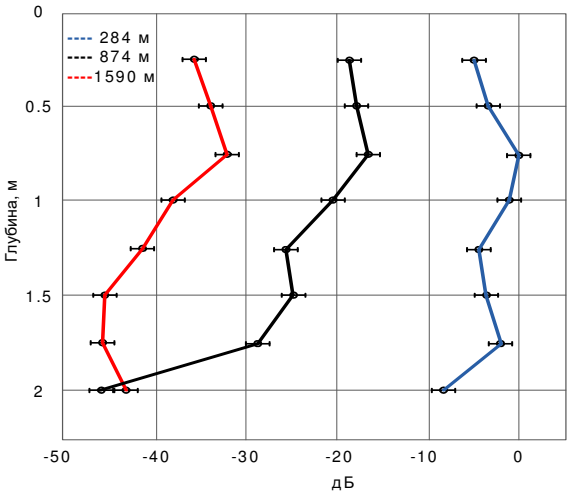


Рисунок 4 – Вертикальное распределение уровня сигнала. Нижний гидрофон на 0.25м выше дна, далее через 0.25м следуют остальные гидрофоны

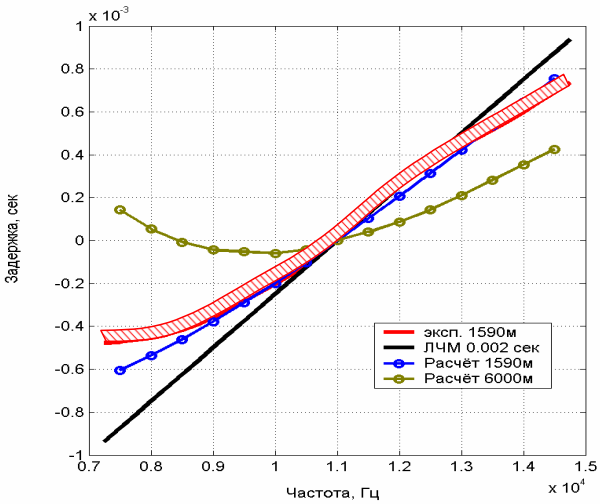


Рисунок 5 – Изменение времени задержки прихода частотных составляющих сигнала с пройденной дистанцией. Расчет и результат эксперимента

Поскольку дисперсия скорости распространения сигнала нелинейным образом зависит от частоты, то и характер частотной модуляции должен быть нелинейным, чтобы получить максимальное сжатие сигнала.

Наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала можно получить при волноводном распространении на протяженных трассах.

Результаты измерений характеристик параметрической антенны в гидроакустическом бассейне показали, что разработанная параметрическая антенна имеет следующие характеристики: ширина ХН – 2º; диапазон частот – (120–150) кГц; тип сигнала – ЛЧМ.

Анализ характеристик показал, что применение в натурных экспериментах позволило выполнить задачу экспериментальных исследований. Для этого в качестве многочастотного сигнала был выбран сигнал с линейной частной модуляцией. Этот сигнал можно представить в виде многокомпонентного сигнала с количеством компонент, стремящимся к бесконечности и с расстоянием между компонентами равным 0.

Измерение геометрии волновода показало, что его можно принять за плоский волновод, так как на расстоянии в 3000м глубина измеряется от 2,3 до 2,8, что составляет 0,02 % от расстояния. Измерение вертикального распространения скорости звука показало, что волновод низкоскоростной, и поэтому рефракции лучей не происходит.

Измерение времени задержек различных частей сигнала волн разностной частоты с линейной частотой модуляцией на разных расстояниях показало хорошее согласие в задержках с теоретическими предположениями.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что дисперсия в волноводе приводит к изменениям структуры сигнала, что может быть использовано в пространственной обработке сигналов для их сжатия и тем самым повышение дальности гидроакустических систем.

Библиографический список

1. Esipov I.B., Kalachev A.I., Sokolov A.D., Sutin A.M., Sharonov G.A. Long Range Propagation Experiments with a powerful Parametric Source. Acoustical Physics. 1994, 40(1), p. 61–64.

2. А.В. Вавилин, А.Р. Козельский, В.Г. Петников, В.М. Резников, Е.А. Ривелис. Особенности дисперсионных искажений импульсных сигналов в акустических волноводах с поглощением**.** // Акустический журнал, 1987г., том XXXIII, вып. 5. с. 830–833.

3. В.А. Воронин, В.П. Кузнецов, Б.Г. Мордвинов, С.П. Тарасов, В.И. Тимошенко Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону «РостИздат», 2007.

4. П.П. Пивнев. Исследование взаимодействия многокомпонентного сигнала в средах с дисперсией. // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Геологическая акустика. Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. Т.1. – М.: ГЕОС, 2006.

Тарасов Сергей Павлович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); Е-

mail: ega@fep.tti.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н. профессор.

Воронин Василий Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); e-mail: ega@fep.tti.ru 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, д.т.н., профессор.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Котляров Валерий Васильевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, ведущий электроник.

Tarasov Sergey P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation; E-mail: ega@fep.tti.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95; the department of Hydroacoustic and medical engineering, Dr of tech. sc., professor.

Voronin Vasiliy A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: , 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Doctor of Engineering Sciences, Professor.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”,

Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Kotlyarov Valeriy V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, leading electronic engineer.

УДК 534.222

П.П. Пивнев

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИЛЬНОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЯХ

Исследования в области нелинейного взаимодействия многокомпонентных акустических сигналов в сильновязких жидкостях носят высокую научную и практическую значимость. При распространении волн в сильновязкой жидкости необходимо учитывать свойства жидкости и процессов, происходящих в ней. В работе представлен результат взаимодействия компонент 10-ти компонентного сигнала накачки в нефти. В заключении приведен анализ поведения компонент волн разностной частоты в нефти для основных параметров компонент сигнала и параметров среды.

Ключевые слова: *нелинейное взаимодействие, сильновязкая жидкость, дисперсия, сигнал накачки, волны разностной частоты*

The research in the field of nonlinear interaction of multi-component acoustic signals in liquids srinavasa is of high scientific and practical significance. The propagation of waves in a highly viscous fluid is necessary to consider the fluid properties and processes occurring in it. The paper presents the result of the interaction component 10 component source pumping in the oil. The conclusion presents the analysis of the behavior of the component waves of the difference frequency in the oil for the main parameters of the components of the signal and the medium.

Key words: *nonlinear interaction, srinavasa liquid, dispersion, signal-pumping, wave difference frequency.*

Акустические измерения можно считать одним из наиболее точных методов исследований равновесных свойств. Для многих типов неравновесных процессов изучение дисперсии и поглощения звука является единственным источником информации. При распространении волн в сильновязкой жидкости необходимо учитывать, что при этом взаимодействие происходит в нефти – сильновязкой жидкости, представляющей собой сложную жидкую смесь близкокипящих углеводородов и высокомолекулярных углеводородных соединений с гетероатомами кислорода, серы, азота, некоторых металлов и органических кислот.

Акустические свойства сильновязких жидкостей характеризуются широкой областью дисперсии $\Delta \sim 10^3$ [103], т.е. большим изменением скорости акустической волны в зависимости от частоты, а также сильной зависимостью затухания от частоты. Разность между скоростью распространения акустической волны на частоте ω и его предельным высокочастотным значением убывает по закону $1/\sqrt{\omega}$ (в маловязких жидкостях, в согласии с релаксационной теорией, - по закону $1/\omega^2$).

Вышеприведенные особенности поведения акустической волны в сильновязких жидкостях связаны со спецификой молекулярных движений в этих жидкостях.

В сильновязких жидкостях силы взаимодействия между молекулами возрастают на столько, что становится возможным распространение поперечной акустической волны.

Для анализа используем результат взаимодействия компонент 10-ти компонентного сигнала накачки в нефти.

Проведем анализ поведения компонент волн разностной частоты (далее ВРЧ) в сильновязкой жидкости для следующих параметров компонент сигнала и параметров среды: сигнал накачки десятикомпонентный, частота каждой компоненты сигнала разностной частоты 1кГц, диапазон частот компонент волн накачки (15–24) кГц, среда – нефть. Такой диапазон выбран, чтобы частоты накачки и частоты генерируемых волн лежали в области дисперсии

В этом случае зная закон изменения скорости от частоты в сильновязкой жидкости, получим для этого случая в формуле

$$c_m = c_0 \cdot \left(1 + \frac{m'}{2} \frac{(m\Omega)^2 \tau^2}{1 + (m\Omega)^2 \tau^2} \right). \qquad (1)$$

Зависимость скорости от частоты для нефти приведена на рис. 1. На этом рисунке вертикальными линиями обозначены положения компонент частот накачки и разностных частот.

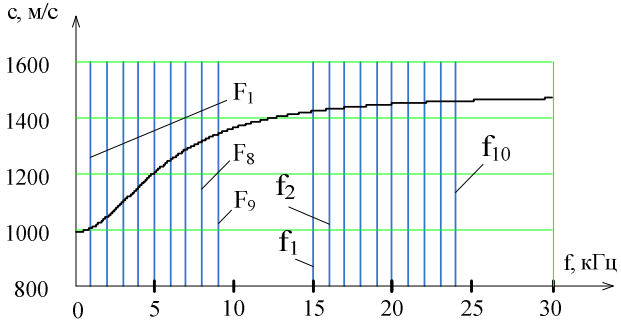


Рисунок 1 – Зависимость скорости от частоты для нефти

Видно, что для различных значений компонент ВРЧ скорости существенно различаются, а для компонент накачки скорости менее различаются (различный наклон дисперсионной кривой).

Проведем анализ, как влияет положение компонент на частотной оси на характеристики генерируемого сигнала волн разностной частоты.

При анализе будем наблюдать изменение амплитуды ВРЧ от расстояния. Амплитуду выразим в относительных величинах $P_н$, ,которые равны отношению в каждой точке по расстоянию амплитуды ВРЧ в среде с дисперсией к максимальному значению амплитуды ВРЧ в среде без дисперсии, а расстояние выразим в длинах зон дифракции на средней частоте волн накачки.

На рис. 2 представлены осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой F_= 1 кГц для частот волн накачки (15–16) кГц (1 и 2 компонент десятикомпонентного сигнала накачки) (кривая 1) и для 23-24 кГц (9 и 10 компонент) (кривая 2).

Из рис. 2 видно, что осевые распределения ВРЧ при различных частотах волн накачки на одинаковой частоте ВРЧ,

различны. Это связано с различным углом наклона дисперсионной кривой (рис. 1).

На рис. 3 представлены осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой F_= 7 кГц, полученные в результате взаимодействия 1 и 8 компоненты десятикомпонентного сигнала накачки (15–22) кГц (кривая 1) и 3 и 10 компонент (17–24) кГц (кривая 2).

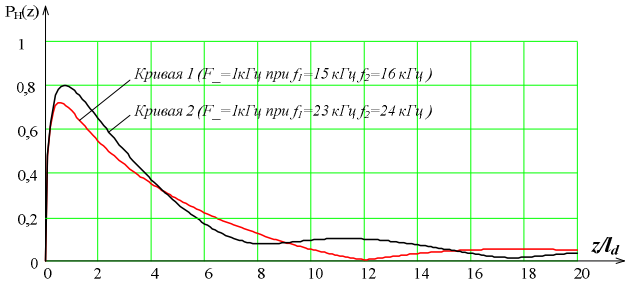


Рисунок 2 – Осевые распределения компонент ВРЧ (F=1 кГц)

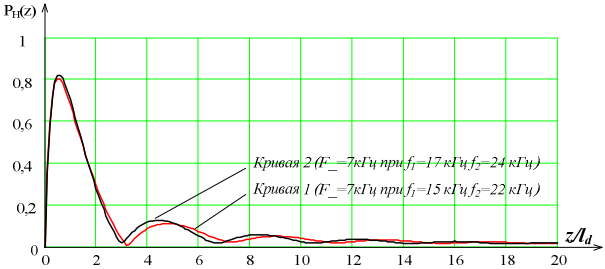


Рисунок 3 – Осевые распределения компонент ВРЧ (F=7 кГц)

На рис. 4 представлены осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ с частотой F_= 8 кГц, полученные в результате взаимодействия 1 и 9 компоненты десятикомпонентного сигнала накачки (15–23) кГц (кривая 1) и 2 и 10 компонент (16 – 24) кГц (кривая 2).

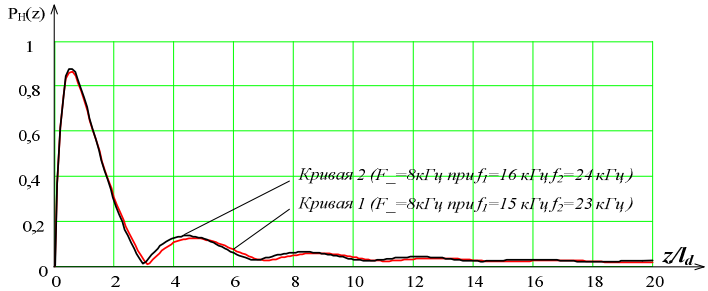


Рисунок 4 – Осевые распределения компонент ВРЧ (F=8 кГц)

На рис. 4 осевые распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ для различных волн накачки, но одинаковых частот ВРЧ сближаются, по сравнению с рис. 2. Это связано с тем, что уменьшилась разница между фазовыми скоростями волн накачки в первом случае (кривая 1) и во втором случае (кривая 2).

На представленных на рис. 2–4 осевых распределениях амплитуд давлений ВРЧ видны осцилляции амплитуд звуковых давлений ВРЧ (дисперсионные искажения осевого распределения волны разностной частоты), которые возникают из-за разности в фазовых скоростях волн накачки и волны разностной частоты. Проанализировав результаты, представленные на рис. 1 и рис. 2–4, можно сделать ряд выводов: на параметры осевого распределения сильное влияние оказывает дисперсия скорости звука, обусловленная большой вязкостью среды; на искажение осевого распределения ВРЧ оказывает влияние как дисперсия в области частот волн накачки, так и дисперсия в области частот ВРЧ.

На рис. 5 и 6 представлены задержки компонент сигнала разностной частоты и компонент сигнала накачки.

Угол наклона задержек зависит от угла наклона дисперсионной кривой. Задержки между различными компонентами сигнала различны (рис. 5 и 6), т.к. зависимость фазовой скорости от частоты нелинейная (рис. 1).

Длительность многокомпонентного сигнала ВРЧ в сильновязкой среде в области дисперсии увеличивается из-за разности в фазовых скоростях компонент.

Таким образом, различные компоненты сигнала ВРЧ приходят в точку пространства в различное время, что приводит к изменению формы сигнала.

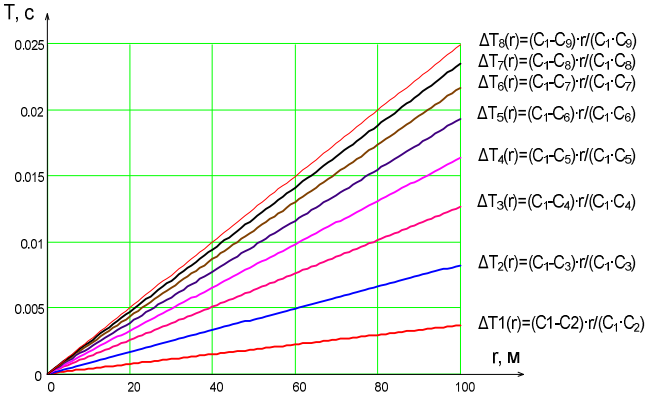


Рисунок 5 – Задержки компонент сигнала ВРЧ

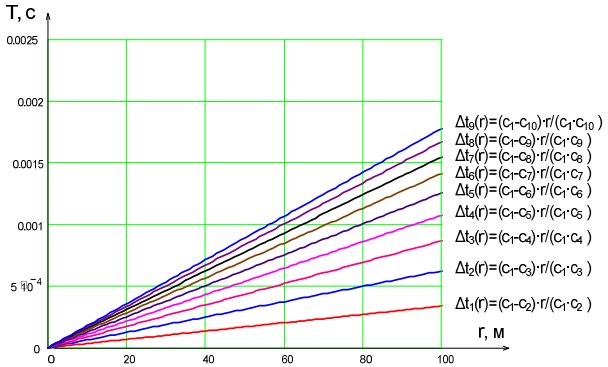


Рисунок 6 – Задержки компонент сигнала накачки

Если излучить многокомпонентный сигнал с задержками, такими, чтобы компоненты сигнала ВРЧ начали распространяться с задержками, представленными на рис. 5, то в точку L, лежащей на оси излучения компоненты, сигнала ВРЧ «догонят» друг друга.

Так, например, в точку, лежащую на оси излучения на расстоянии 50 м от излучателя, компоненты ВРЧ придут в разное время (времена прихода показаны на рис. 7).

Теперь сформируем сигнал накачки таким образом, чтобы компоненты сигнала ВРЧ начали распространяться с задержками, представленными на рис. 8. Компоненты такого сигнала ВРЧ в точку L, лежащую на расстоянии 50 м от излучателя, придут одновременно. Т.е. произойдет максимальное сжатие сигнала ВРЧ в этой точке.

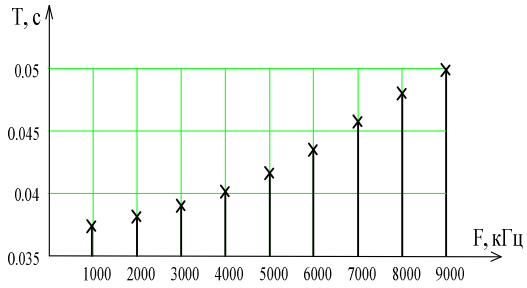


Рисунок 7 – Времена прихода компонент сигнала ВРЧ
в точку L лежащую на расстоянии 50м от источника

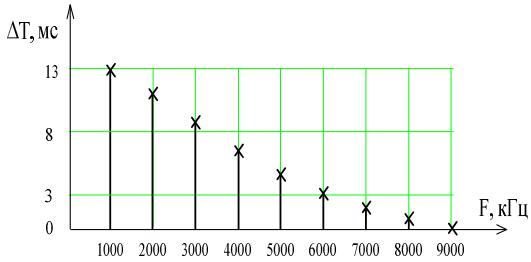


Рисунок 8 – Задержки компонент сигнала ВРЧ

Следовательно, зная закон дисперсии и вводя вычисленные задержки по компонентам, можно повышать дальность действия акустических систем с параметрическими антеннами работающих в сильновязких жидкостях, таких как нефть.

Библиографический список

1 Д. Дж. Бенни и др. Нелинейные взаимодействия случайных волн в дисперсионной среде.// Перевод с английского языка статьи из журнала Nonlinear interactions of random waves in a dispersive medium, Royal Society of Landon proceedings, v.a289, 1966, 301-320;

2 П.П. Пивнев. Исследование характеристик нелинейного взаимодействия волн в нефтепроводе с учетом затухания. // Нелинейная гидроакустика. Труды научной конференции. Ростов-на-Дону 2006;

3 Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. -Л.: Судостроение, 1981. С. 264;

4 В.А. Воронин, В.П. Кузнецов, Б.Г. Мордвинов, С.П. Тарасов, В.И. Тимошенко. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону «РостИздат», 2007.

Пивнев Петр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП); E-mail: pivnev@mail.ru.; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел. 8 (8634) 37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Pivnev Peter P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, e-mail: pivnev@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8 (8634)37-17-95, the department of Hydroacoustic and medical engineering, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

УДК 681. 883

П.В. Рахно, В.П. Рыжов

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКЕ

Показано, что преимущества нелинейных гидроакустических систем, в частности, с параметрическими антеннами, могут быть в полной мере реализованы только при использовании сложных сигналов. Приведены сведения об основных классах сложных сигналов для решения задач гидролокации и связи, а также даны основные соотношения для оценки потенциальных погрешностей частотно-

временных измерений и разрешающих способностей локационных систем.

Ключевые слова: *нелинейная акустика, параметрические антенны, гидролокация, сложные сигналы, частотно-временные измерения, функции неопределенности.*

It is shown that the advantages of nonlinear sonar systems in particular with parametric antennas can be fully implemented only with using of compound signals. Represented information about the main classes of compound signals for solving problems of sonar and communications as well as are given the basic relations for estimation of potential errors of time-frequency measurements and resolution of radar systems.

Key words: *nonlinear acoustics, parametric antennas, sonar, compound signals, time-frequency measurement, ambiguity function.*

Использование нелинейных эффектов в гидроакустике позволило создать широкий спектр ее практических приложений, прежде всего, в гидролокации [1]. Однако реализация всех потенциальных возможностей гидроакустических систем с использованием нелинейных эффектов возможна лишь на основе оптимизации систем на сигнальном уровне, которая не может быть выполнена без перехода к сложным сигналам.

Известно [1], что параметрические излучающие антенны позволяют излучать широкополосные сигналы в узком (единицы градусов) телесном угле при практическом отсутствии боковых лепестков, что обусловлено протяженной бестелесной зоной формирования излучения и разделением в пространстве процессов формирования и преобразования электрической энергии в акустическую. Это создает предпосылки для использования сигналов с большой базой, т.е. произведением ширины спектра F на длительность сигнала T: $B = FT >> 1$.

Ориентация на сложные сигналы обусловлена тем, что потенциальные возможности гидроакустических систем, в частности, связанные с важнейшими частотно-временными измерениями, зависят от протяженности сигнала и ширины его спектра. Так, потенциальные среднеквадратические погрешности оценки времени прихода и частоты сигнала равны [2]:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{Q\sqrt{\left|\chi''(0)\right|}} = \frac{1}{Q\Delta f_{эфф}}; \ \sigma_F = \frac{1}{Q\sqrt{\left|\chi''(0)\right|}} = \frac{1}{Q\Delta\tau_{эфф}},$$

где $Q = \sqrt{\frac{2E}{S_0}}$ – энергетическое отношение сигнал/помеха, E – энергия сигнала, S_0 – спектральная плотность мощности помехи в виде белого гауссова шума, $\chi(\tau,\Omega) = \frac{1}{E}\int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)e^{j\Omega t}dt$ – нормированная функция неопределённости сигнала $s(t)$.

Для сигналов с прямоугольными формами огибающей и спектра справедливы приближённые соотношения для среднеквадратических погрешностей оценки дистанции σ_D и скорости объекта локации σ_V:

$$\sigma_D = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{c}{\pi\cdot Q\cdot F}; \sigma_V = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\lambda}{\pi\cdot Q\cdot T},$$

где c – скорость распространения волны, λ – длина волны.

Из приведенных соотношений следует, что для обеспечения более высокой точности частотно-временных измерений гидролокационных систем необходимо одновременно увеличивать длительность сигналов и их ширину спектра, что возможно лишь для сложных сигналов.

Одним из наиболее простых классов сложных сигналов являются сигналы с угловой модуляцией: $s(t) = A\cos[\omega_0 t + \Phi(t)]$, где $\Phi(t)$ – полная фаза сигнала.

Для самого простого и распространенного сигнала с линейной частотной модуляцией фаза изменяется квадратично, соответственно мгновенная частота – линейно. Но такой сигнал не позволяет одновременно точно измерять время прихода и частоту, т.к. его функция неопределенности (ФН) имеет вид наклонного эллипса:

$$\chi(\tau,F) = \sin\left[\left(\frac{f_\partial\tau}{2T} + \pi F\right)(T - |\tau|)\right]\left[\left(\frac{f_\partial\tau}{2T} + \pi F\right)T\right]^{-1},$$

где f_∂ – девиация частоты.

Для одновременного измерения времени и частоты можно применять сигнал с симметричной (V-образной) частотной

модуляцией с крестообразной ФН, либо сигналы с квадратичной частотной модуляцией. В частности, для сигнала с V-образной частотной модуляцией ФН имеет вид:

$$\chi(\tau, F) \approx \frac{1}{2}\left[\sqrt{\frac{\pi}{\beta T^2}} + \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)\Delta(\tau, F)\right],$$

где
$$\Delta(\tau, F) = \frac{\sin(2\pi F - \beta\tau/\pi)(T - |\tau|)}{(2\pi F - \beta\tau/\pi)(T - |\tau|)} + \frac{\sin(-2\pi F - \beta\tau/\pi)(T - |\tau|)}{(-2\pi F - \beta\tau/\pi)(T - |\tau|)},$$

$\beta = \omega_\partial / T$ ·

Такие сигналы удобно использовать в гидролокации: их ширина спектра определяется, в основном, девиацией частоты.

Другой класс широко используемых сложных сигналов – фазоманипулированные сигналы, составленные из коротких радиоимпульсов со скачками фазы на π. Чаще всего они представлены *M*-последовательностями и кодами Баркера, которые обладают наименьшим уровнем боковых лепестков и практически кнопочной формой ФН. К сожалению, коды Баркера существуют лишь до 13-позиционной последовательности. Их особенно удобно использовать в системах подводной связи.

Еще одним классом сложных сигналов, практически не применяемом в гидроакустике, являются частотно-временные кодированные сигналы (ЧВК-сигналы). Отличительной особенностью таких сигналов является дискретное изменение частоты от импульса к импульсу в пределах последовательности по определенному закону (коду). Для таких сигналов обычно задается центральная частота, диапазон перестройки частоты (аналог девиации частоты) и частотно-временная кодирующая матрица. На основе ЧВК-сигналов возможно как создание аналогов частотно-модулированных сигналов с непрерывной модуляцией, так и синтез сигналов с требуемыми ФН, в частности, последовательностей Костаса [3]. Применение таких сигналов позволяет не только разместить в одном канале связи множество абонентов, но и обеспечить высокую скрытность передачи (за счет малого уровня – ниже уровня шумов), а также эффективное кодирование на основе стохастических матриц. Иглообразная ФН таких сигналов обеспечивает параметры, близкие к потенциально достижимым в системах связи и локации. Ниже на рис.1 приведен вид функции неопределенности такого рода сигналов (последовательность Костаса 10x10).

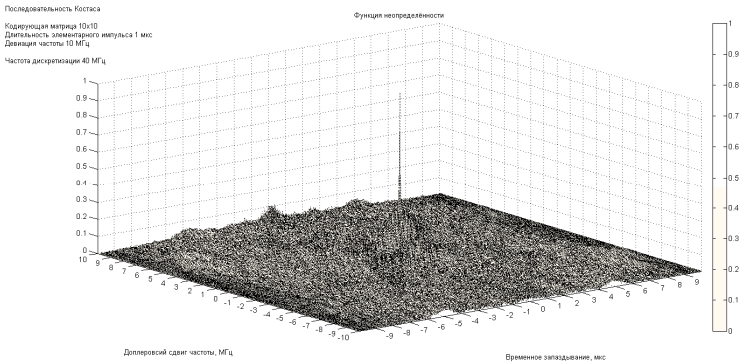


Рисунок 1 – ФН последовательности Костаса

Конечно, реальные условия подводного наблюдения – морская реверберация, многолучевость распространения волн, искажения сигналов должны вносить коррективы в приведенные потенциальные соотношения. Но и в реальных условиях возможности использования сложных сигналов значительно выше, чем простых сигналов. В частности, показано, что помехоустойчивость сложных сигналов при наличии реверберации и сосредоточенных помех значительно выше, чем для простых сигналов [4].

Библиографический список

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов н/Д: Ростиздат, 2004.
2. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. – М.: Вузовская книга, 2002.
3. Levanon, Nadav. Radar signals / Nadav Levanon, Eli Mozeson, 2004.
4. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации.– Л.: Судостроение, 1983.

Рахно Павел Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических

систем и управления (ИРТСиУ); E-mail: forsage-pashok@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.; 8-950-859-31-28, кафедра теоретических основ радиотехники, магистрант.

Рыжов Владимир Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ); E-mail: forsage-pashok@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.; 8-950-859-31-28, кафедра теоретических основ радиотехники.

Rakhno Pavel V. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of radio-engineering systems and management, e-mail: forsage-pashok@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8-950-859-31-28.

Ryzhov Vladimir P. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education "Southern Federal University", Institute of radio-engineering systems and management, e-mail: forsage-pashok@mail.ru, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 8-950-859-31-28.

УДК 616.28-008.1

И.А. Кириченко, Т.В. Титова

Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ЭГА и МТ Кириченко И.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА СФИГМОГРАММ

В докладе рассмотрены вопросы применения метода сфигмографии. На основании разработанной структурной схемы измерительного преобразователя артериальной пульсации крови предложена реализация распространения пульсовой волны в среде LabVIEW.

Ключевые слова: *пульсовая волна, сфигмограмма, виртуальный прибор.*

The report deals with the application of the method of sphygmography. On the basis of the developed structural scheme of measuring Converter of arterial pulsation of blood suggested the implementation of pulse wave propagation in the environment of LabVIEW.
Key words: *pulse wave, sphygmogram, virtual instrument.*

В настоящее время возросло внимание к изучению эффективности виброакустического терапевтического воздействия на процессы в организме человека, связанные с нарушениями кровотока в тех или иных органах и тканях. В основе действия вибрации лежит биологический резонанс. Поэтому механические вибрации вызывают реакцию соответствующих рецепторов раздражением, которое по интенсивности едва превышает энергию теплового движения молекул. Воздействие микровибраций в диапазоне звуковых частот приводит к увеличению кровотока в капиллярах, снижает сосудистое сопротивление движению крови, увеличивает ее циркулирующий объем [1, 2].

При разработке терапевтической аппаратуры основной интерес представляет исследование условий передачи воздействия, сформированного техническими средствами, к биологическим тканям, а также выбор формы, интенсивности, длительности и других параметров воздействия, согласованных с характеристиками физиологических систем организма. Изучение данных вопросов требует совместного рассмотрения технических и биологических элементов в рамках единой биотехнической системы (БТС) целенаправленного действия.

Виброакустическая терапевтическая система с обратной связью (ОС) имеет две составляющие: виброакустический канал (ВК) - источник виброакустического воздействия – и канал ОС. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Канал ОС строится на основе регистрации амплитуды кривой пульсовой волны. Датчик пульсовой волны предназначен для съема биологического сигнала обратной связи с поверхности тела пациента.

Квазипериодические биосигналы, в том числе пульсовой сигнал лучевой артерии, имеют сложную ритмическую структуру, характеризующуюся совокупностью различных колебательных компонент, отличающихся по амплитуде, фазе и частоте [3].

Методика анализа сигнала пульсовой волны заключается в определении ряда параметров отражающих количественные и качественные характеристики сердечно сосудистой системы.

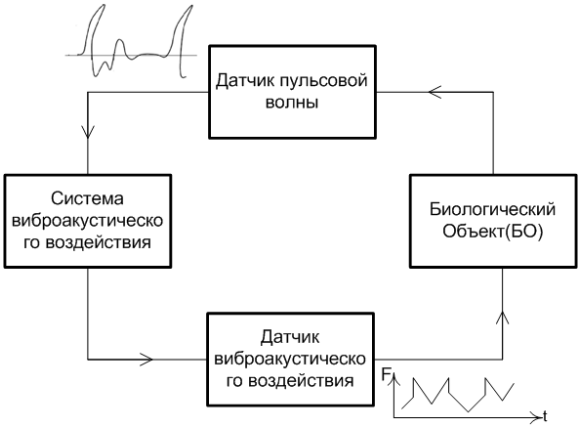


Рисунок 1 – Структурная схема системы

На рис. 2 изображена блок-диаграмма, где последовательно соединены устройство ввода сигнала, фильтр нижних частот и устройство вычисления взаимной корреляционной функции [4].

Виртуальный сфигмограф работает в режиме вычисления взаимной корреляционной функции. На входы коррелятора сигналы поступают от независимых источников по двум каналам, выделенным с помощью разветвителя. Положение первого максимума взаимной корреляционной функции на оси времени соответствует времени задержки сигнала одного канала относительно сигнала другого.

На рис. 3 представлена рабочая панель виртуального сфигмографа. Математическая модель пульсовой волны, рассмотренная как функция трех переменных в EXCEL [5], трудно реализуема в среде LabView. Поэтому при моделировании работы сфигмографа был применен тестовый сигнал, полученный при сложении прямоугольного импульса и синусоиды [4].

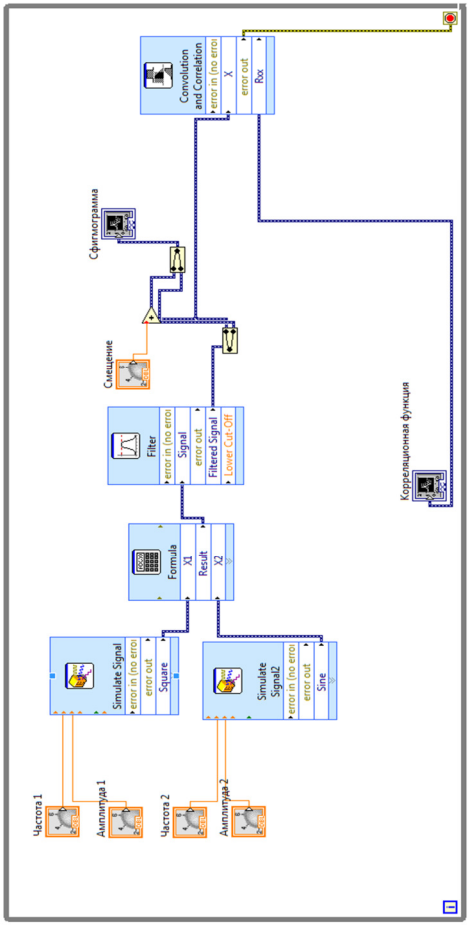

Частота 1
Амплитуда 1
Simulate Signal
error in (no error)
error out
Square
Частота 2
Амплитуда 2
Simulate Signal2
error in (no error)
error out
Sine
Formula
X1
Result
X2
Filter
error in (no error)
Signal
error out
Filtered Signal
Lower Cut Off
Смещение
Сфитмограмма
Convolution and Correlation
error in (no error)
X
error out
Rxx
Корреляционная функция

Рисунок 2 – Блок-диаграмма виртуального сфигмографа

В результате моделирования элементов биотехнической системы в среде LabView разработан виртуальный сфигмограф, реализующий функцию моделирования сигнала пульсовой волны, а также расчет основных диагностических показателей.

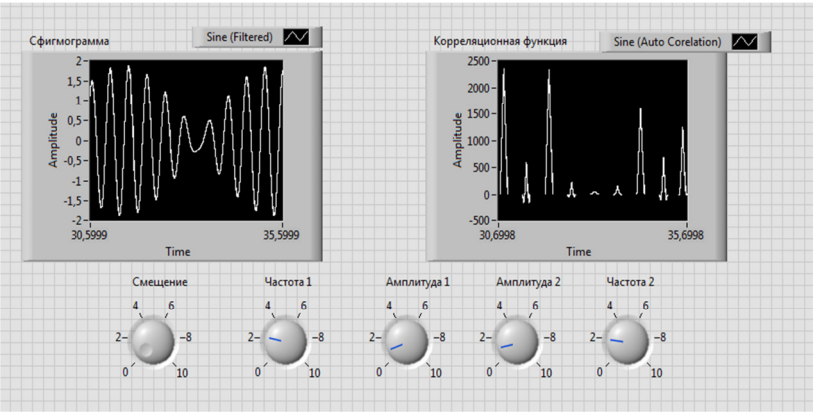


Рисунок 3 – Рабочая панель виртуального сфигмографа

Библиографический список

1.Кириченко И.А., Пустынников И.А. Механизм виброакустического терапевтического воздействия // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «МИС-2004». – Таганрог: Изд-во ТРТУ – 2004. – №6(41). – С.213–214.

2.Машанский В.Ф., Рабинович И.М. Медикобиологические основы вибротерапии. – Л.: Знание. – 1990. – 126с.

3.Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Пер. с англ. Под ред. А.П. Немирко. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 440с.

4. .LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. – М.: ДМКПресс; ПриборКомплект – 2005. – 544 с.

5.Акулов В.А. Модель пульсовой волны и ее реализация в среде EXCEL // Татарский государственный гуманитарно

педагогический университет: Межвузовский сборник научных трудов- г. Казань – 2008. – С.13–16.

Кириченко Игорь Алексеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, доцент.

Титова Татьяна Викторовна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Kirichenko Igor A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of acoustics and medical technology, associate professor.

Titova Tatyana V. –Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44, building E, E-mail ikirichenko@sfedu.ru, department of acoustics and medical technology, student.

УДК 681.327

А.К. Хамидулина, В.А.Боженюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТЕЗА РУКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ СХЕМЫ ВЫВОДА

В данной статье ставится задача управления протезом кисти. Для решения поставленной задачи предлагается модель принятия решения на основе нечеткого правила modus ponens. Проводится анализ и преобразование входных данных для применения предложенной модели.

Ключевые слова: *электромиограмма, протез руки, нечеткий вывод, modus ponens, дефаззификация, функция принадлежности.*

A model for controlling hand prosthesis is developed in this paper. The hand movements are described by angles of finger and wrist flexion. The problem is set as determination of all angles using electromyography of forearm muscles. The decision-making model with basic fuzzy rule modus ponens is used to solve the problem.

Key words: *electromyogram, hand prosthesis, fuzzy inference, modus ponens, defuzzification, membership function.*

В последние годы различные робототехнические устройства все шире внедряются в сферу медицины [1,2]. Одним из перспективных направлений медицинской робототехники является протезирование конечностей и их отдельных частей [3]. Наиболее интересные технические решения возможны в области биометрического протезирования, при котором управление протезом осуществляется на основании информации, полученной из электромиограммы (ЭМГ) [4]. В данной статье рассматриваются некоторые вопросы моделирования движения протеза кисти руки, управляемого потенциалами мышц. Несмотря на то, что современные биометрические протезы достигли довольно высокого уровня точности распознавания входных потенциалов, большинство из них обладает существенным недостатком – дискретностью движений на выходе. Данный недостаток обусловлен используемыми методами классификации, применяемыми при распознавании жестов [5]. В данной статье предлагается подход к моделированию движения протеза кисти руки, основанный на использовании методов принятия решений на основе нечеткого логического вывода [6,7]. В данной

статье предлагается для выбора решения о движении использовать модель принятия решения на основе степени истинности нечеткого правила modus ponens [8].

В данной статье рассматривается система управления биометрическим протезом руки. Входными данными в нашем случае являются ЭМГ сигналы, а выходными – значения углов сгибания фаланг пальцев и кисти. При построении системы управления использовались ЭМГ, полученные при анализе мышечной активности предплечья.

В качестве характеристики сигнала для классификации было использовано RMS (среднее квадратическое значение амплитуды ЭМГ сигнала), которое вычисляется по следующей формуле

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}} \qquad (1)$$

где x_i – амплитуда ЭМГ сигнала, рассматриваемого жеста, n – количество ЭМГ сигналов рассматриваемого жеста в выборке.

На основе вышеизложенного нами ставится задача идентификации жеста протеза по входным ЭМГ сигналам предплечья руки с применением нечеткого правила modus ponens в качестве метода принятия решения о возможном движении протеза.

Для построения модели принятия решения (ПР) формируется логико-лингвистическое описание взаимосвязей входных управляющих и выходных управляемых параметров. Формирование лингвистических моделей осуществляется на естественном или близком к нему языке в виде совокупности правил типа <если ... то ..>, которые образуют основу базы знаний процесса ПР.

Здесь основную роль играет дедуктивное правило modus ponens, имеющее вид:

$$\frac{\begin{array}{c} P_1 :< \text{если } A \text{ есть } a \text{ то } B \text{ есть } b >; \\ P_2 :< A \text{ есть } a > - \text{истинно;} \end{array}}{< B \text{ есть } b > - \text{истинно.}}$$

Тестовая выборка состоит из набора значений 8-ми параметров, вычисляемых по формуле (1) и набора углов, на которые должны согнуться фаланги пальцев и сустав кисти, чтобы сформировать одно из 7-ми движений. Была собрана статистика в качестве среднего по всей выборке значения входного параметра для каждого движения.

На следующем графике приведены средние значения RMS, получаемого с 3-его электрода для каждого из 7-ми движений:

Анализ полученных данных выявил избыточность входных данных. То есть можно обойтись 3-мя входными параметрами для однозначного описания выходного движения (набора углов). Значения RMS электродов под номером 3, 5 и 6 являются необходимыми входными параметрами, которые были в дальнейшем использованы.

В таблице 1 приведена лингвистическая кодировка 3-х входных параметров для каждого из 7-ми движений

Таким образом, базовыми лингвистическими переменными являются: для 3-его параметра - $\tilde{A}=\{\tilde{A}_1,\tilde{A}_2\}$, где $\tilde{A}_1$ = «малое», $\tilde{A}_2$ = «большое»; для 5-ого - $\tilde{B}=\{\tilde{B}_1,\tilde{B}_2,\tilde{B}_3\}$, где $\tilde{B}_1$ = «малое», $\tilde{B}_2$ = «среднее», $\tilde{B}_3$ = «большое»; для 6ого – $\tilde{C}=\{\tilde{C}_1,\tilde{C}_2\}$, где $\tilde{C}_1$ = «малое» и $\tilde{C}_2$ = «большое».

Таблица 1

Лингвистическое описание входных параметров

Номер параметра	Номер движения						
	1	2	3	4	5	6	7
3	М	М	М	Б	М	М	М
5	Б	С	Б	М	С	М	М
6	Б	М	М	Б	Б	Б	М

Б – большое; С – среднее, М – малое.

Принимая во внимание вышеизложенное, получим функцию принадлежности для 3его параметра, представленного на рис. 3. Нужно иметь в виду, что углы наклона являются экспертными данными.

Аналогично составляются функции принадлежности для остальных параметров.

На выходе мы должны получить определенное положение руки. Положение руки описывается углами фаланг пальцев и углами поворота кисти. В следующей таблице приведены значения углов для каждого из 7 рассматриваемых движений.

Таблица 2

Значения углов для каждого движения

	пальцы			большой палец				
Номер движения	фаланга1	фаланга2	фаланга3	фаланга1	фаланга2	фаланга3	угол α кисти	угол β кисти
1	0	0	0	0	0	0	180	0
2	90	90	90	0	15	0	180	0
3	0	0	0	0	0	0	0	-45
4	0	0	0	0	0	0	0	45
5	0	0	0	0	0	0	180	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	90	0

Преобразовав входные и выходные параметры к значению функций принадлежности лингвистическим переменным, мы можем применить модель принятия решения, основываясь на нечетких высказываниях, которые задаются экспертно.

Полученные результаты обеспечивают базовый уровень для дальнейших исследований, ориентированных на реализацию модели принятия решения на основе нечеткого правила modus ponens для отдельного независимого движения пальцев биометрического протеза. Особый интерес также представляет усовершенствования алгоритма с учетом специфики поставленной задачи, для этого необходимо продолжить изучение зависимости между параметрами, использованными в распознавании биопотенциалов мышц руки, и непосредственно выходными данными. В будущих исследованиях также планируется аппаратная реализация протеза, построенного на использование рассмотренного метода нечеткой логики.

Библиографический список

1. E. Garcia, M.A. Jimenez, P. Gonzalez de Santos and M. Armada, “The Evolution of Robotics Research: From Industrial Robotics to Field and Service Robotics” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 14, No. 1, 2007. pp. 90-103.

2. S.Sabanovic, S.Milojevic, P.Asaro, M.Francisco, “Robotics Narratives and Networks [History]” Robotics & Automation Magazine, vol. 22, Issue 1. 2015. pp. 137 – 146.

3. Muzumdar Ashok (ed.), “Powered Upper Limb Prostheses: Control, Implementation and Clinical Application” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

4. P.A.Kaplanis, C.S.Pattichis, L.J.Hadjileontiadis, and S.M.Panas, “Bispectral analysis of surface EMG” in Proc. 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, vol. II, 2000. pp. 770–773.

5. Rubana H. Chowdhury, Mamun B. I. Reaz, Mohd Alauddin Bin Mohd Ali, Ashrif A. A. Bakar, Kalaivani Chellappan, Tae G. Chang, “Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques” Sensors, 2013, 13, pp.12431-12466.

6. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. -165с.

7. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. - М.: Мир, 1993.- 368с.

8. А.В.Боженюк, В.В.Шадрина. Нечеткая классификация ситуаций и принятие решений в системах магистрального транспорта газа // Известия ТРТУ. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. №10 (65). – С. 9-12.

9. Modeling of a Motion of Hand Prosthesis Based on the Fuzzy Deductive Inference Scheme

Хамидулина Александра Константиновна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения (ИНЭП), 347928 Ростовская область, г.Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е, E-mail alkons95@mail.ru, кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, студент.

Боженюк Виталий Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», институт компьютерных технологий и информационный безопасности. Email: avb@itt.net.ru, кафедра математического обеспочения и применения ЭВМ, студент.

Hamidulina Alexandra K. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of nanotechnology, electronics and instrumentation, 347928 Rostov areas, Taganrog, GSP 17A, the lane Nekrasovsky, 44,

building E, E-mail: alkons95@mail.ru., department of acoustics and medical technology, student.

Vitalii Bozheniuk A. – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”, Institute of computer technology and information security Southern Federal University. Email: avb@itt.net.ru. 347928 Rostov region, Taganrog, GSP 17A per.Nekrasovsky, 44, Bldg. I, Department of mathematical support and computer application, student.

Научное издание

Нелинейная акустика-50

Сборник трудов

Ответственный за выпуск Чернов Н.Н.

Работа печатается в авторской редакции

Подписано в печать 16.12.2015
Формат 60x84 1/16 Уч.-изд. лист. – 15,8
Печ. лист. 16,0 Тираж 50
Заказ №

Издательство Южного федерального университета
344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1.
Тел. (634)2478051.
Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1.
Тел. (8634)371717, 371655.