

На правах рукописи

Воронин Артем Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРИЕМНОЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ В ПРОСТРАНСТВЕ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ**

Специальность 01.04.06 Акустика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог

2017

Работа выполнена на кафедре «Электрогидроакустической и медицинской техники» института нанотехнологий электроники и приборостроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

- Научный руководитель: Тарасов Сергей Павлович
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
г. Таганрог
- Официальные оппоненты: Каевицер Владилен Иосифович
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Фрязинский филиал института Радиотехники и
Электроники им. В.А. Котельникова РАН
г. Москва
- Савицкий Олег Анатольевич,
кандидат физико-математических наук,
начальник отделения,
АО «Акустический институт имени академика Н.Н.
Андреева»
- Ведущая организация: ООО КБ Морской электроники «Вектор»,
г. Таганрог

Защита состоится 05.04.2018 в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.208.23 ФГАУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ауд. Е-306.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной библиотеке Южного федерального университета по адресу 344090 г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21-ж и на сайте <http://hub.sfedu.ru/diss>.

Отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью организации и оформленный согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней» (п.28), с указанием ФИО (полностью) лица, представившего отзыв, почтовым адресом, наименованием организации, его должности в этой организации, телефона и адреса электронной почты просим направлять в ЮФУ по адресу: 347922, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корпус «Е», лаб. 112, ученому секретарю совета Д212.208.23 Исаевой А.С.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.208.23

Исаева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Параметрические акустические излучающие антенны в настоящее время широко используются для построения излучающих трактов профилографов, гидролокаторов из-за их уникальных характеристик, таких как постоянство характеристики направленности в широком диапазоне излучаемых частот, малый уровень боковых лепестков в характеристике направленности, малые габариты антенн накачки при сравнительно узких характеристиках направленности на рабочих частотах. Однако применение их в локационных системах связано с построением отдельных приемных антенных систем, которые не всегда имеют малые размеры в низкочастотном рабочем диапазоне, а использование антенн накачки в качестве приемных антенн нецелесообразно из-за низкой чувствительности их на низких (рабочих) частотах.

Параметрические излучающие антенны необратимы, т.е. работают только в режиме излучения. Однако, используя эффект нелинейного взаимодействия волн, можно создать приемные параметрические антенны, которые обладают свойством «бестелесности» и поэтому могут заменить традиционные приемные антенны в гидролокационных системах в случаях, если необходимо использовать малые габариты приемных антенных систем, освободить измерительное пространство в гидроакустических бассейнах от преобразователей, создать узкую характеристику направленности приемной антенны в сейсмических системах.

На основе идеи взаимодействия акустических волн существенно разных частот возможно построение приемной акустической параметрической антенны, применение которой в гидроакустических системах позволяет эффективно решать некоторые актуальные задачи в гидроакустике. Во-первых, это создание приемных устройств с высокой направленностью и «бестелесностью», т.е. отсутствием преобразователей в теле антенны. Это свойство при использовании приемной акустической параметрической антенны в гидроакустическом бассейне позволяет освободить ось бассейна от приемных преобразователей и повысить точность измерения некоторых характеристик гидроакустических систем. Кроме того, отсутствие преобразователей в теле антенны уменьшает погрешность измерений, обусловленную дифракцией акустических волн на измерительной системе. Во-вторых, возможно построение векторных приемных систем применением двух приемных высокочастотных преобразователя волны накачки, и соответствующей обработкой результатов взаимодействия волн, фиксируемых этими преобразователями. В-третьих, можно определять направление прихода низкочастотной волны, для чего и предназначены направленные приемники звука.

Используя эффект нелинейного взаимодействия волн, можно создать приемные параметрические антенны, которые обладают свойством «бестелесности» и поэтому могут заменить традиционные приемные антенны в гидролокационных системах в случаях, если необходимо использовать малые габариты приемных антенных систем, освободить измерительное пространство в гидроакустических бассейнах от преобразователей, создать узкую характеристику направленности приемной антенны в сейсмических системах.

В то же время для создания направленного приема волн в параметрическом акустическом приемнике необходимы два высокочастотных преобразователя волн накачки (излучающего и приемного), расположенные на значительном расстоянии друг от друга. А для поворота характеристики направленности необходимо поворачивать систему этих преобразователей, так как максимальная чувствительность приемной параметрической антенны реализуется при коллинеарном распространении взаимодействующих волн. Возможность поворота характеристики направленности приемной параметрической антенны существует в средах с зависимостью скорости звука от частоты распространяющихся волн. Задача исследования взаимодействия волн разных временных масштабов в среде с частотной дисперсией для создания приемных параметрических антенн с изменяющейся в пространстве характеристикой направленности, которая рассматривается в настоящей работе, является важной и актуальной.

Цель работы. Целью диссертационной работы являются теоретические и модельные исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в приемной параметрической антенне в средах с частотной дисперсией и затуханием и разработка систем со сканированием характеристики направленности приемной параметрической антенны.

Задачи исследования. В диссертации решаются следующие задачи:

- теоретические исследования взаимодействия акустических волн в средах с физической и геометрической дисперсией скорости звука;
- исследования влияния затухания волн накачки в параметрической приемной антенне на ее характеристики направленности;
- моделирование характеристик направленности параметрической приемной антенны в средах с дисперсией скорости волн и с затуханием;
- разработка принципов практической реализации приемных параметрических антенн с управляемыми в пространстве характеристиками направленности.

Научная новизна работы. В работе получены следующие новые результаты:

- разработана модель приемной акустической параметрической антенны в средах с газовыми включениями;
- разработана модель приемной акустической параметрической антенны при работе преобразователей накачки в круглом цилиндрическом акустически прозрачном на частоте сигнала волноводе;
- разработана математическая модель влияния затухания высокочастотных волн накачки и волн комбинационных частот на характеристики приемной акустической параметрической антенны при взаимодействии волн накачки и волн сигнала;
- на основе математического моделирования характеристик приемной антенны в средах с зависимостью скорости распространения фазового фронта акустической волны от частоты и с затуханием волн накачки показано, что при наличии дисперсии волн накачки характеристика направленности приемной параметрической антенн поворачивается в сторону от оси распространения волн накачки. С увеличением фазовой скорости волны накачки угол отклонения оси характеристики направленности антенны увеличивается. Наличие затухания волн накачки ведет к расширению характеристики направленности приемной акустической параметрической антенны и к «заплыванию» нулей в ее характеристике направленности.

Практическая значимость работы состоит в разработке:

- приемных акустических параметрических антенн с поворотом характеристики направленности путем изменения частоты волн накачки при использовании геометрической дисперсии фазовой скорости волн накачки;
- приемных параметрических антенн со сканированием характеристики направленности в средах с газовыми включениями;
- приемных параметрических антенн с веером характеристик направленности;
- методик применения приемных параметрических антенн в гидролокаторах бокового обзора для локализации шумящих источников, локализации придонных структур и повышения производительности работ при поиске биоресурсов.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на использовании решения систем уравнений механики сплошных сред, уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова, теории направленного излучения и приема волн. Моделирование характеристик проводится с использованием пакета программ MathCad. Достоверность результатов исследований подтверждалось сравнением с исследованиями полученными другими авторами в области формирования характеристик направленности антенн.

На защиту выносятся:

- математическая модель приемной параметрической антенны с поворотом характеристики направленности в виде круглого звукопрозрачного, для волн сигнала, волновода и в средах с газовыми включениями;

- результаты моделирования поворота характеристик направленности в приемной параметрической антенне в средах с геометрической и физической дисперсией;
- математическая модель приемной параметрической антенны в средах с затуханием волн накачки и результаты моделирования влияния затухания на характеристику направленности;
- методики реализации приемных параметрических антенн со сканированием характеристики направленности, с веером характеристик направленности.

Апробация работы

Материалы докладывались на:

-- научно-технической конференции «Экология 2006 - море и человек», Таганрог, 2006 г.;

III Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов ДонНТУ. Украина, Донецк, 2007;

- научной школе-семинаре им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXI сессией Российского Акустического Общества, 2009 г.;

- научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50», Таганрог, 2015 г.;

- международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», г. Владивосток, 2015 г.

Публикации

по результатам исследования опубликовано 22 печатных работы, из них в изданиях, рекомендованных высшей аттестационной комиссией - 10. В материалах конференций различного уровня – 6. Получен патент на изобретение на способ и устройство.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация выполнена в соответствии с паспортом специальности 01.04.06

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 121 страницу и содержит 47 рисунков. В списке цитируемой литературы содержится 148 наименований источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены методы исследования, выделены научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, и другие общие характеристики работы

В **первой главе** проводится обзор литературных источников, касающихся вопросов взаимодействия акустических волн в приемной параметрической антенне. Приводятся результаты исследований взаимодействия волн при неколлинеарном распространении волн накачки и волн сигнала. Дается общее решение для взаимодействия неколлинеарных волн. Здесь же рассматриваются эффекты, возникающие при распространении акустических волн в волноводах и в средах с воздушными включениями. Показано, что в этих случаях возникает зависимость фазовой скорости акустических волн от их частоты. Рассматриваются схемы построения параметрических акустических приемников при различных вариантах обработки принимаемых сигналов. Показано, что применение схем обработки с фазовым детектированием сигналов накачки в приемном тракте предпочтительно перед применением схем с фильтрацией составляющих, возникающих в результате взаимодействия волн.

Во **второй главе** рассматриваются общие вопросы взаимодействия акустических волн в средах с дисперсией на основе проведенных ранее различными авторами исследований.

Приводится решение задачи взаимодействия волн в параметрическом приемнике звука. Рассматривая задачу управления характеристиками направленности в параметриче-

ской акустической приемной антенне, необходимо рассмотреть два случая, характеризующие возможность практического использования и построения таких антенн. Для создания направленности в приемной параметрической антенне необходимо разнести на некоторое расстояние, названное базой антенны, излучающий и приемный преобразователи накачки. При размещении преобразователей накачки в волноводе возникает геометрическая дисперсия волн накачки, а при работе такой антенны в реальной среде на ее характеристики будет влиять состояние окружающей среды, а именно, большое количество воздушных включений в месте буксировки, обусловленное приповерхностным слоем моря и кильватерным слоем носителя. В такой среде существует явление физической дисперсии – зависимости скорости распространения акустических волн от частоты.

На рисунках 1 и 2 приведены схемы приемных параметрических антенн для этих случаев, на которых условно показаны параметры приемной параметрической антенны: ω_H – круговая частота волны накачки; ω_c – круговая частота принимаемого сигнала; L – база антенны; Θ – угол прихода сигнала. Точками условно обозначены воздушные включения. Исследования показали, что преобразователи накачки параметрической приемной антенны могут быть помещены в акустический волновод. В этом случае исключается влияние воздушных включений на характеристики параметрической приемной антенны, но волны накачки распространяются в волноводе, в котором существует геометрическая дисперсия, распространяющихся волн. На рисунке 2 показана схема буксировки с приемной параметрической антенной в волноводе.

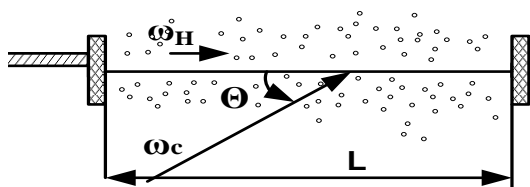


Рисунок 1 – Приемная параметрическая антенна в приповерхностном слое и кильватерном следе носителя

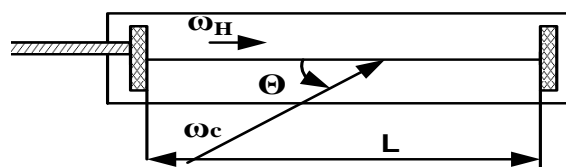


Рисунок 2 – Приемная параметрическая антенна в волноводе

В параметрической приемной антенне взаимодействуют волны с разными частотами и разными амплитудами, при этом частоты и амплитуды волн сильно различаются. Было установлено, что легче всего реализовать приемную параметрическую антенну на основе фазового детектирования сигнала накачки. Поэтому представим поле акустической волны накачки следующим выражением:

$$\varphi(t, \vec{r}) = \varphi_0 \exp \left\{ -i \left[\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) + \Psi(t, \vec{r}) \right] \right\} \quad (1)$$

где $\varphi(t, \vec{r})$ – потенциал колебательной скорости акустической волны; φ_0 – амплитуда колебательной скорости плоской высокочастотной волны накачки, распространяющейся вдоль оси X в соответствии с заданными параметрами модели.

Комплексная фаза $\Psi(t, \vec{r})$ содержит собственно фазу (вещественная часть) и логарифм амплитуды или уровень (мнимая часть). Фаза в уравнении $\Psi(t, \vec{r})$ обусловлена взаимодействием волн накачки с принимаемым низкочастотным сигналом. В отличие от высокочастотной фазы, обусловленной распространением высокочастотной волны эта фаза изменяется медленно и обусловлена распространением сигнальной волны, которая изменяет параметры среды, в которой распространяется высокочастотная волна.

Рассмотрим изменения фазовой скорости распространения волн в среде с газовыми включениями.

На рисунке 3 для примера приведена зависимость изменений фазовой скорости звука в морской воде от частоты, распространяющейся в среде волны, и резонансной частоты воздушных пузырьков, содержащихся в воде, для трех различных размеров пузырьков, а на рисунке 4 та же зависимость при одной концентрации для трех различных концентраций воздушных пузырьков.

Анализ зависимостей показывает, что при изменении частоты акустической волны скорость распространения фазового фронта может быть, как меньше, так и больше скорости волны в однородной среде. Причем изменение распределения концентрации и размеров пузырьков ведет к изменениям в характеристике направленности параметрической акустической приемной антенны.

Рассмотрим приемную параметрическую антенну, состоящую из круглого волновода, в котором распространяется акустическая высокочастотная волна накачки. Для высокочастотной волны стенки волновода не прозрачны. Скорость распространения фазового фронта акустической волны в таком волноводе зависит от частоты, распространяющейся в нем волны. По длине при приеме низкочастотного сигнала, для которого волновод акустически прозрачен, будет создано фазовое распределение источников, возникающих в результате нелинейного взаимодействия высокочастотной и низкочастотной волн, меняющееся при изменении частоты высокочастотной волны (волны накачки). При таком построении приемной параметрической антенны распределение образовавшихся источников описывается формулой:

$$a(x, t) = Ae^{i(\omega t - \alpha(x))} \quad (2)$$

В общем случае линейное распределение фазы сгенерированных источников по длине антенны приводит к повороту характеристики направленности антенны. Затухание высокочастотных волн накачки влияет на эффективность взаимодействия и, следовательно, на чувствительность приемной антенны.

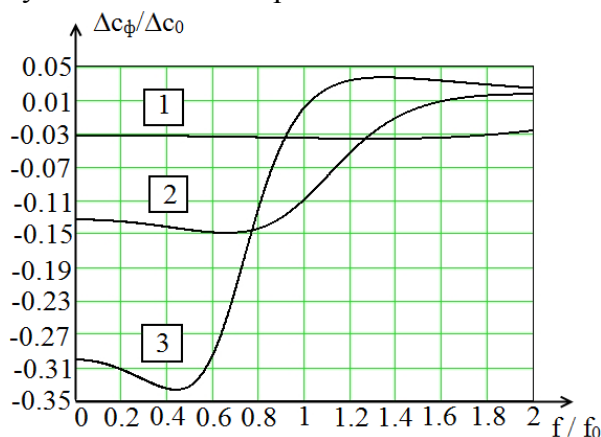


Рисунок 3 - Зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при размерах воздушных пузырьков: кривая 1 – $a = 0,02$ мм, кривая 2 – $a = 0,04$ мм, кривая 3 – $a = 0,06$ мм.

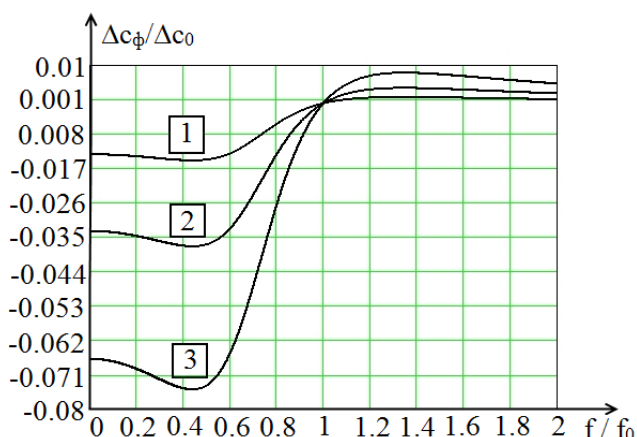


Рисунок 4 - Зависимость фазовой скорости звука в морской воде от частоты при различной концентрации воздушных пузырьков: кривая 1 – $n = 10$, кривая 2 – $n = 25$, кривая 3 – $n = 50$.

Для того чтобы найти характеристику направленности приемной параметрической антенны необходимо сложить чувствительности всех точек антенны при приходе сигнала с определенного направления. Проинтегрируем результаты взаимодействия в ка-

ждой точке антенны по ее длине, учитывая распределение фазы источников. В результате получим

$$\Psi_0 = \frac{P_{0\Omega} kL}{2 \rho_0 c_0^2} \left(\varepsilon - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \cdot \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx, \quad (3)$$

Так как фазовая скорость распространения фазового фронта акустической волны в круглом волноводе может изменяться от скорости акустической волны в свободном пространстве до бесконечности, то необходимо выяснить как будет изменяться характеристика направленности при таком диапазоне изменений фазовых скоростей. В формуле (3) направленность в основном определяется интегралом. Поэтому во всех дальнейших расчетах направленности будем учитывать только его влияние. Тогда характеристика направленности будет вычисляться по следующему выражению:

$$R(\theta) = \int_0^L e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx, \quad (4)$$

Третья глава посвящена определению закономерностей формирования характеристик направленности приемной параметрической антенны в средах с дисперсией проводится математическое моделирование этих характеристик.

На рисунке 5 приведены диаграммы направленности приемной параметрической антенны в полярной системе координат в плоскости, проходящей через ось антенны вдоль направления распространения высокочастотных волн, то есть через ось приемной параметрической акустической антенны, рассчитанные по выражению (4) для базы антенны $L/\Lambda=10$, $c_0=1500$ м/с, $v_\phi=1500$ м/с, 2000 м/с, 5000 м/с.

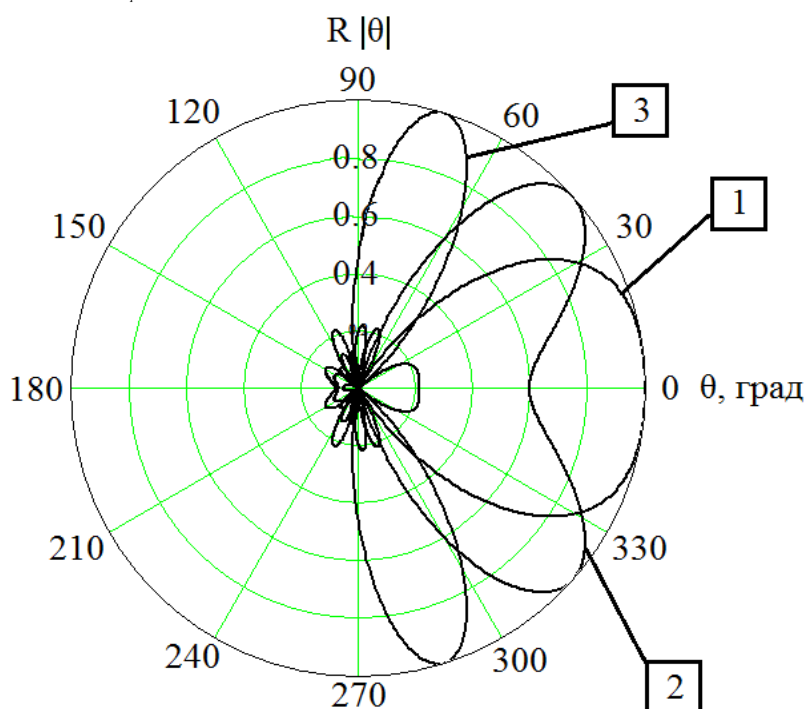


Рисунок 5 – Диаграмма направленности параметрического приемника при $c=1500$ м/с при $v_\phi=1500$ м/с(1), $v_\phi=2000$ м/с(2), $v_\phi=5000$ м/с(3)

Анализируя результаты расчетов диаграмм направленности можно сделать вывод, что при увеличении фазовой скорости высокочастотной волны в волноводе по сравнению со скоростью распространения волн в свободном пространстве диаграмма направленности приемной параметрической антенны изменяется.

При $v_{\phi} = c_0$ чувствительность для волны сигнала максимальна в направлении противоположном направлению распространения волны накачки.

Характеристика направленности в этом случае совпадает с характеристикой направленности антенны бегущей волны в свободном пространстве.

Расчеты диаграмм направленности приемной параметрической акустической антенны устанавливают, что при увеличении фазовой скорости акустической волны накачки основной лепесток поворачивается в сторону от оси приемной акустической параметрической антенны. Форма характеристики направленности представляет собой торообразное тело вращения представленной диаграммы направленности вокруг направления распространения высокочастотных волн.

Анализируя характеристики направленности, приведенные выше, можно заметить большой уровень боковых лепестков в характеристиках направленности. В теории антенных решеток рассматриваются вопросы уменьшения уровня боковых лепестков путем введения амплитудных распределений коэффициентов возбуждения по поверхности антенны.

Преобразуя (4) путем введения амплитудного распределения источников, образованных в результате взаимодействия волны сигнала и волны накачки, при учете затухания высокочастотных компонент образованного спектра получим следующее выражение для расчета параметров характеристики направленности приемной параметрической антенны с учетом затухания акустических волн:

$$R(\theta) = \frac{\int_0^L e^{-\eta x} e^{i\alpha(x)} \cdot e^{ikx(1-\cos\theta)} dx}{\int_0^L e^{-\eta x} dx} . \quad (5)$$

Затухание высокочастотных компонент отражается в этом выражении множителем $e^{-\eta x}$, который показывает как изменяются амплитуды высокочастотных компонент с прошедшим ими расстоянием. Коэффициент затухания в этом выражении обозначается η .

Затухание волн по длине антенны различно для волн накачки и волн сигнала из-за большого различия по частоте. Рассмотрим случай, когда скорость распространения фазового фронта акустической высокочастотной волны накачки совпадает со скоростью акустической волны в свободном пространстве и со скоростью распространения низкочастотной волны сигнала. На рисунке приведены в декартовой системе координат диаграммы направленности параметрической акустической приемной антенны для разных значений коэффициента затухания волны накачки. Для существенного проявления эффекта влияния затухания коэффициент затухания взят заведомо большим. Диаграммы направленности рассчитывались для следующих параметров антенны: для $L/\lambda = 10$, $c_0 = 1500$ м/с, $v_{\phi} = 1500$ м/с. Кривая рисунка ба соответствует коэффициенту затухания, равному 0, рисунка бб – 0,5, рисунка бв – 1, рисунка бг – 2.

Приведенные на рисунках диаграммы направленности демонстрируют, что увеличение затухания волн накачки приводит к появлению амплитудного распределения источников вторичных волн по длине приемной параметрической антенны. Это приводит к увеличению ширины характеристики направленности, повышению уровня бокового поля и «заплыванию» нулей в характеристике направленности антенны. С увеличением коэффициента затухания эти эффекты проявляются в большей степени.

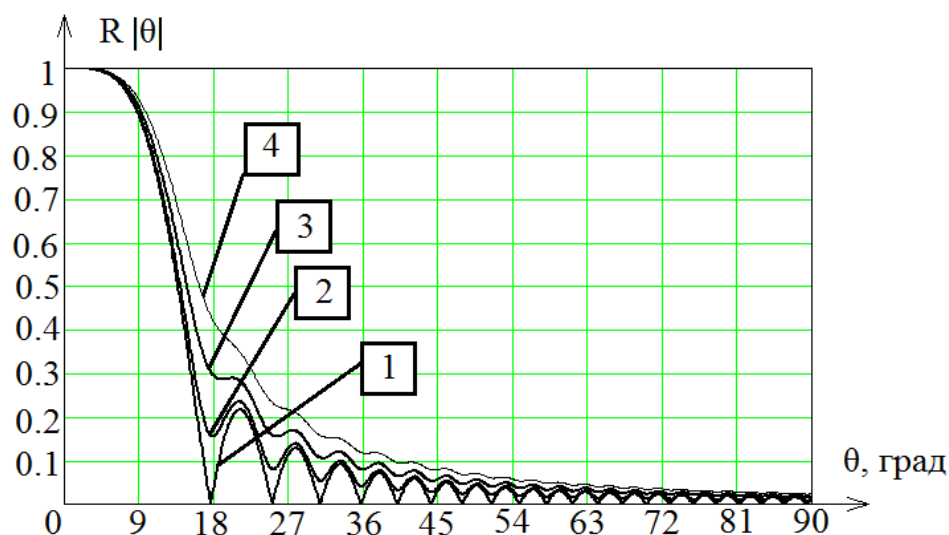


Рисунок 6 - Диаграммы направленности параметрической акустической приемной антенны в среде без дисперсии при коэффициенте затухания равном 0 1/м (1), 0.5 1/м (2), 1 1/м (3), 2 1/м (4).

Результаты расчетов диаграмм направленности параметрической акустической при повороте ее характеристики направленности за счет частотной дисперсии и амплитудном распределении источников вторичных волн при затухании высокочастотных составляющих приведены на рисунке 7. Для расчетов брались те же параметры антенны, что и в предыдущем случае, а скорость распространения фазового фронта волны накачки принималась равной 2000 м/с .

Моделирование поведения характеристик направленности при их повороте и затухании взаимодействующих волн показывает, что закономерности поведения характеристик направленности при их повороте путем варьирования частоты волн накачки и их затуханием сохраняются. Проявляется характерная несимметричность основного лепестка относительно акустической оси антенны, проходящей через максимум характеристики направленности. В теории линейных антенн при сканировании характеристики направленности и введении амплитудного распределения по длине антенны проявляются такие же закономерности, что косвенным образом подтверждает правильность проведенных исследований.

Таким образом, характеристики направленности приемных параметрических антенн зависят от параметров среды распространения волн и параметров взаимодействующих волн, что необходимо использовать в практических применениях таких антенн.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований приемной параметрической антенны. В ней выбраны направления экспериментальных исследований, аппаратура для проведения экспериментов и разработаны методики проведения исследований. Измерены углы поворота приемной параметрической антенны при изменении частоты волны накачки в волноводе.

Для исследований выбрано взаимодействие акустических волн в круглом волноводе прозрачном для волны сигнала и не прозрачном для волны накачки. Такой выбор обусловлен тем, что в этом случае взаимодействие волн происходит в относительно контролируемой среде, в то время как в среде с газовыми пузырьками контроль концентрации и размеров пузырьков затруднителен.

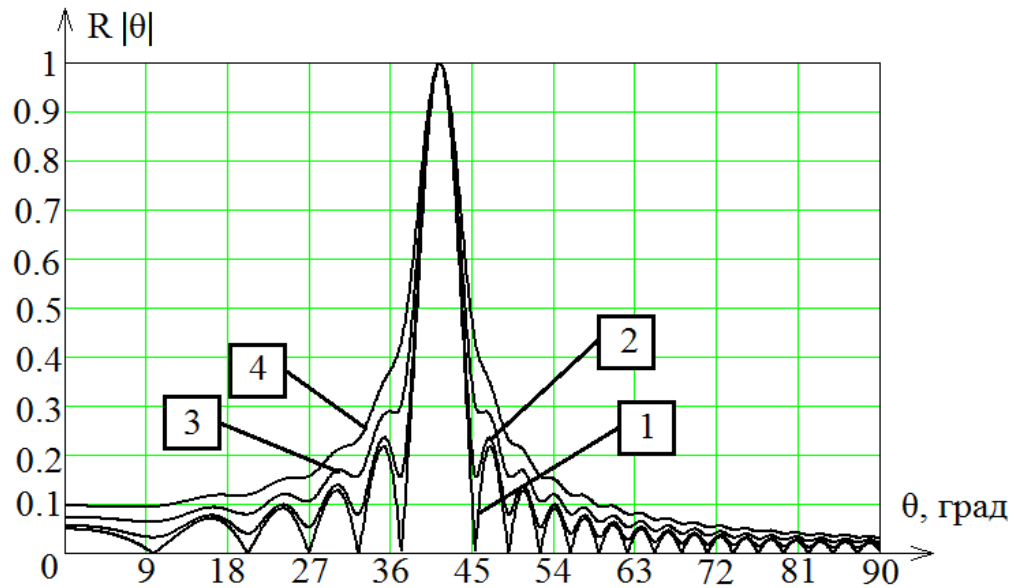


Рисунок 7- Диаграммы направленности приемной параметрической антенны при повороте характеристики направленности и с затуханием волн накачки равном 0 1/м(1), 0.5 1/м(2), 1 1/м(3), 2 1/м(4).

Экспериментальные исследования проводились в имитационно-натурном гидроакустическом комплексе в гидроакустическом бассейне. Бассейн акустически заглушен и имеет комплекс аппаратуры для проведения измерений и закрепления антенн на поворотных устройствах.

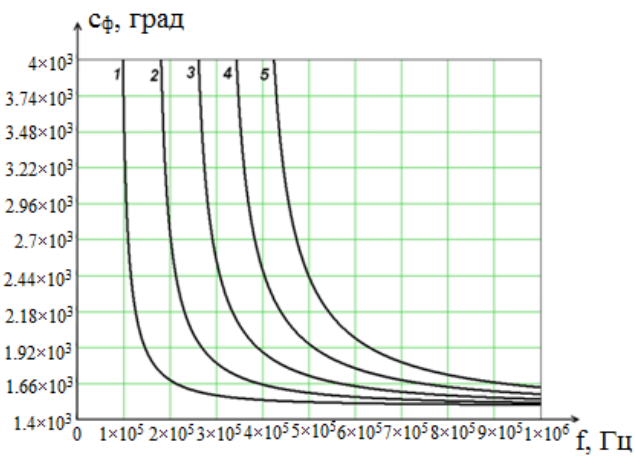


Рисунок 8– Зависимость фазовой скорости от частоты для используемого волновода

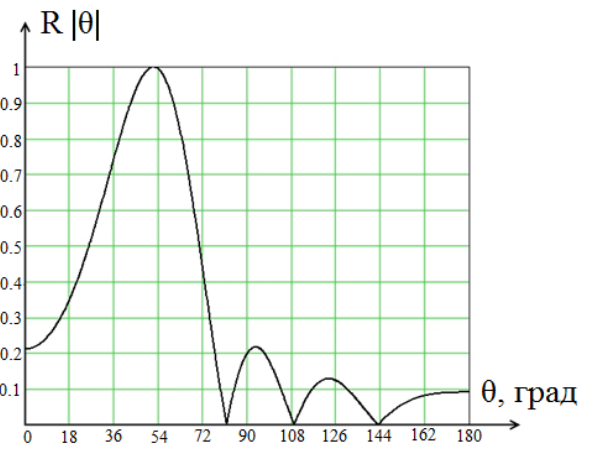


Рисунок 9 – Характеристика направленности приемной параметрической антенны для частоты накачки 500 кГц, частоты сигнала 20 кГц и длине волновода 1 м

Зависимость фазовой скорости от частоты для пятой моды волновода рассчитывалась по выражению (9) и приведена на рисунке 8. Цифрами на рисунке обозначены моды волновода, а кривые около цифр зависимости фазовой скорости распространения волн от частоты.

Для проведения экспериментальных исследований выбираем пятую моду волновода, так как изменение частоты в этой области для выбранного волновода позволяет проследить поворот характеристики направленности в большом диапазоне углов. Для этой моды волновода характеристика направленности приемной параметрической антенны и ее

положение для частоты волны накачки 500 кГц и частоты принимаемого сигнала 20 кГц, рассчитанная по выражению 5, приведена на рисунке 9.

$$c_{01} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\pi \cdot \alpha_{01} \cdot c}{a \cdot \omega} \right)^2}} \quad (9)$$

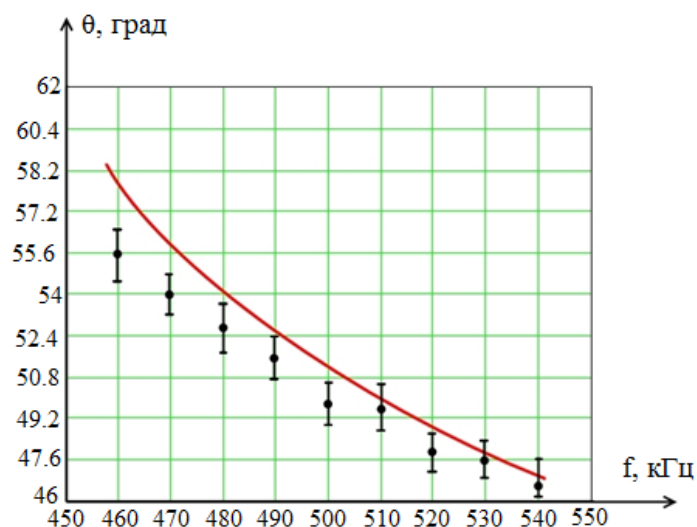


Рисунок 10 – Угол поворота характеристики направленности в зависимости от частоты накачки параметрического приемника

Зависимость, приведенная на этом рисунке, показывает, что при выбранных параметрах волновода и частоты характеристика направленности должна повернуться на угол приблизительно 54 градуса.

Результаты измерений угла поворота характеристики направленности приемной параметрической антенны для приведенных выше параметров волновода, диапазона частот волны накачки и частоты волны сигнала приведены на рисунке 10. На рисунке сплошной линией показана теоретическая кривая, точками экспериментальные значения, а отрезки на точках – доверительный интервал, полученный по результатам обработки. Измерения угла поворота характеристики направленности проводились 10 – 15 раз для каждой точки и значения доверительных интервалов определялись по распределению Стьюдента.

Результаты экспериментальных исследований занижены по сравнению с теоретическими предсказаниями угла поворота характеристики направленности. Эти расхождения объясняются тем, что волновод выполнен из пластика и его стенки не акустически жесткие для волн накачки в выбранном диапазоне частот накачки. Поэтому фазовые скорости волн накачки могут отличаться от рассчитанных.

Анализ проведенных измерений показал, что реализация поворота характеристики направленности в приемной параметрической антенне возможна и ниже приведены схемы приемных параметрических антенн, реализующий принцип поворота характеристики направленности приемной параметрической антенны изменением частоты накачки при использовании волноводных систем или систем, работающих в среде, содержащей газы пузырьки.

Для проверки возможности реализации приемной параметрической антенны «локационного» типа ранее были проведены экспериментальные исследования характеристик направленности такой антенны. Для этого, приемный и излучающий преобразователи накачки размещались вместе (можно было использовать один преобразователь в совмещенном режиме), а на некотором расстоянии от них закреплялся отражатель, представляющий

собой металлическую пластину размером 20×20 см. Волны накачки излучались преобразователем накачки, распространялись в сторону отражателя, отражались и принимались приемным преобразователем накачки. Базой антенны, в этом эксперименте, служило расстояние от преобразователей до отражателя. Взаимодействие волн, возможно только при коллинеарном распространении взаимодействующих волн, поэтому следовало ожидать прием сигналов со стороны отражателя и со стороны преобразователей. Сигнал излучался низкочастотным преобразователем, описанным выше. При измерении характеристики направленности излучателем сигнала формировался тональный сигнальный импульс длительностью 2 мс с частотой заполнения 30 кГц. Расстояние между преобразователями накачки и отражателем составляло 50 см. принятый сигнал регистрировался регистратором в качестве которого был использован самописец типа 2307 фирмы «V&K» (Дания).

На рисунке 11 приведена диаграмма направленности параметрического приемника для выбранных параметров приемника и сигнала. По горизонтальной оси отложен угол поворота антенны, а по вертикальной – уровень принятого сигнала в дБ. 0 градусов соответствует направлению линии преобразователи накачки – отражатель на источник сигнала.

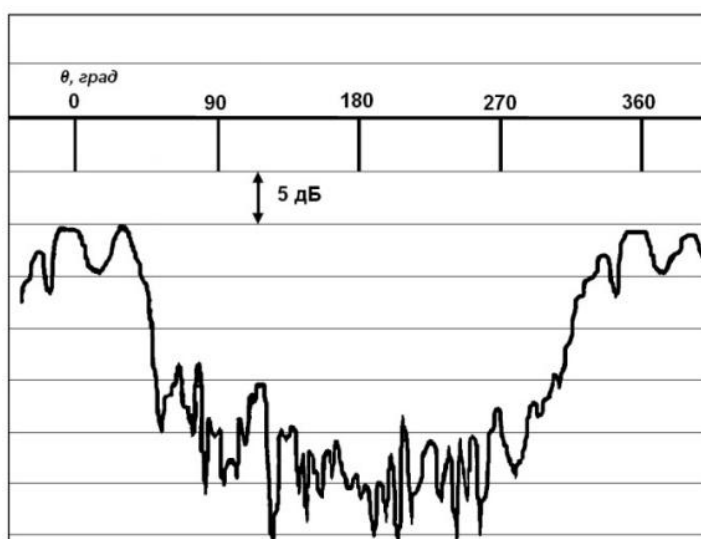


Рисунок 11 – Диаграмма направленности приемной параметрической антенны «локационного» типа

Диаграмма направленности имеет в основном лепестке осцилляции, которые объясняются затенением принимаемого сигнала отражателем. Полученные зависимости показали принципиальную возможность использования приемной параметрической антенны «локационного» типа для океанологических и других исследований и использования ее в гидроакустической аппаратуре различного назначения.

Пятая глава посвящена разработке принципов построения акустических систем с управляемой в пространстве характеристикой направленности. Ниже приведены некоторые варианты построения такой приемной параметрической антенны.

На рисунке 12 приведена схема разработанной параметрической приемной антенны с веером статических лучей в характеристике направленности.

На рисунке 13 показана примерная структура системы, содержащей в своем составе высокочастотный гидролокатор бокового обзора и приемную многолучевую параметрическую антенну локационного типа на примере приема сигналов от гидробионтов.

Для анализа характеристик локационной параметрической антенны необходимо использовать модель взаимодействия сферических акустических волн. Излучающим преобразователем накачки в такой системе, по существу, является участок дна, рассеивающий высокочастотную волну. Низкочастотные сигналы, излучаемые гидробионтами, излучаются из примерно того же участка дна, что и рассеянные высокочастотные волны.

Расстояние до дна достаточно велико и все спектральные составляющие имеют сферический фазовый фронт волны. Для приемной акустической параметрической антенны с большой базой антенны, равной расстоянию от участка, рассеивающего высокочастотные волны, до многолучевой приемной антенны можно определить так:

$$P(L) = \frac{A(\omega)L}{k \sqrt{1 + \left(\frac{L}{l_d}\right)^2}}, \text{ где } A(\omega) = \frac{P_\omega P_\Omega}{c_0^4 \rho_0} \left[\frac{\gamma + 1}{2} \omega^2 - \Omega \omega (1 - \cos \Theta) (2 - \gamma - \cos \Theta) \right];$$

l_d – длина зоны дифракции высокочастотной волны; λ – длина высокочастотной волны накачки;

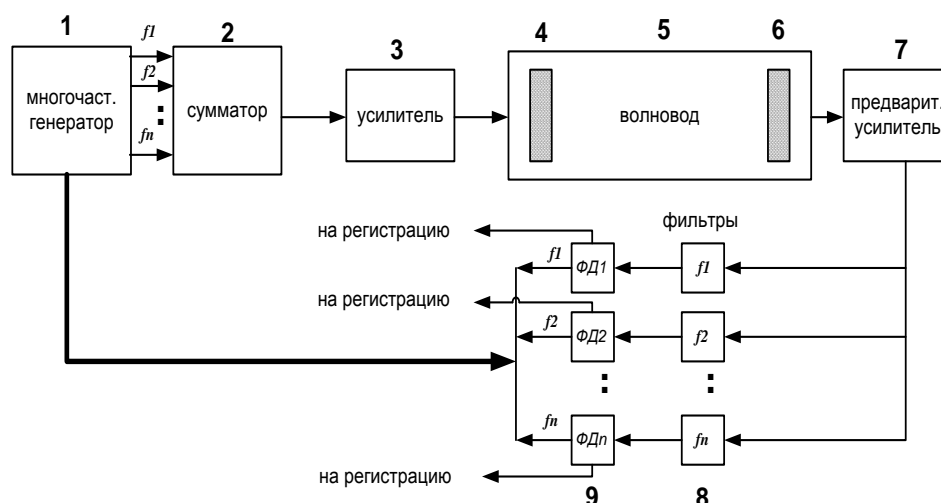


Рисунок 12–Реализация веера статических лучей в приемной параметрической антенне волны

P_Ω – амплитуда низкочастотной волны сигнала, излучаемого гидробионтом; Θ – угол прихода сигнала; a – эффективный размер антенны, определяемый рассеивающим участком дна; L – база (длина) приемной параметрической антенны, по существу, расстояние от дна в точке расположения гидробионта до приемной антенны; γ – параметр нелинейности среды; $c_0 \rho_0$ – равновесные скорость звука и плотность среды распространения волн.

Поскольку длина приемной акустической параметрической антенны, а частота накачки высокая, то на чувствительность такой антенны будет сильно влиять затухание высокочастотной волны накачки и, поскольку комбинационные волны, образованные ее взаимодействием с низко частотным сигналом, тоже высокочастотные, то затухание будет влиять и на их характеристики. При учете затухания всех высокочастотных составляющих решение примет вид

$$|P(L)| = \frac{A(\omega)L}{k \sqrt{1 + \left(\frac{L}{l_d}\right)^2}} \exp\left(-\frac{L}{l_\zeta}\right), \text{ где } l_\zeta = \frac{1}{\alpha + \alpha_- + \alpha_+} \text{ – длина зоны затухания высоко-}$$

частотных волн.

Это выражение описывает зависимость чувствительности параметрической приемной антенны от ее длины.

Кроме того, рассеяние высокочастотных волн под малыми скользящими углами будет мало, однако, при использовании параметрических приемных антенн с фазовой обработкой сигнала накачки малость сигнала накачки не скажется на чувствительность приемной антенны, а только увеличится шумовая составляющая.

Разработанные схемы построения параметрических приемных антенн позволили запатентовать одну из реализаций такого устройства.

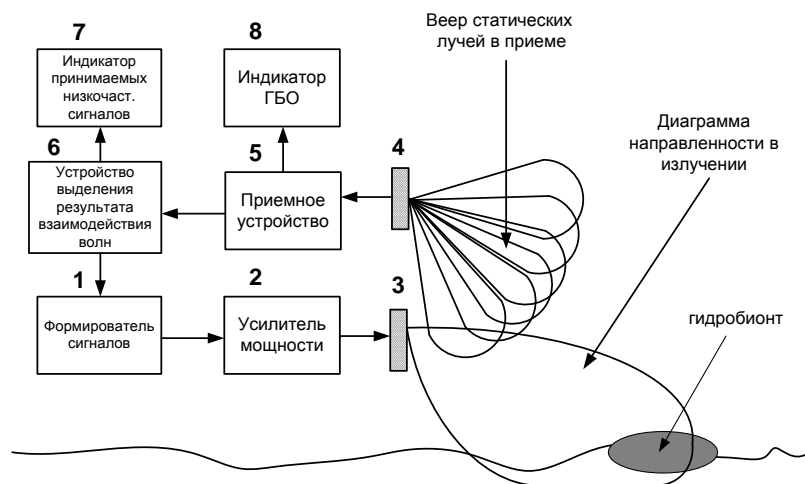


Рисунок 13 – Примерная структура гидролокатора бокового обзора с веером лучей и параметрическим приемником локационного типа.

В **заклучении** формулируются основные результаты исследований по теме диссертации.

В результате выполнения исследований по теме диссертационной работы были проведены работы по созданию приемных параметрических акустических антенн с управляемой в пространстве характеристикой направленности. При этом:

- проведен обзор по вопросам построения математических и физических моделей приемных акустических параметрических антенн;
- рассмотрены вопросы распространения волн в средах с физической и геометрической дисперсией;
- рассмотрены общие вопросы взаимодействия акустических волн в средах с изменяющейся скоростью распространения акустических волн при изменении частоты акустических колебаний;
- решена задача взаимодействия акустических волн в приемной параметрической антенне;
- рассмотрены модели и характеристики приемных параметрических антенн в средах с физической и геометрической дисперсией;
- показано, что затухание волн накачки и волн комбинационных частот изменяют характеристики направленности приемной параметрической антенны в средах с дисперсией фазовой скорости;
- в средах с изменяющейся скоростью распространения фазового фронта проведено математическое моделирование характеристик направленности приемной акустической параметрической антенны;
- показано, что изменение частоты накачки ведет к изменению фазовой скорости волны и к повороту характеристики направленности в пространстве;
- проведенное моделирование влияния затухания волны накачки на характеристики направленности приемной параметрической антенны показало, что в характеристике направленности уменьшается уровень боковых лепестков, «заплывают» минимумы; при повороте характеристики направленности боковое поле становится несимметричным;
- предложены структуры приемной акустической параметрической антенны с электронным поворотом характеристики направленности акустической приемной параметрической антенны и с веером статических лучей характеристики направленности, образованным изменением частоты накачки приемной параметрической антенны;

- разработана структура акустической параметрической приемной антенны, работающей на отраженных волнах, для ее применения в системах с параметрическим профилографом бокового обзора;

- приведены материалы, отраженные в патенте, на способ и устройство, полученном по результатам исследований.

В приложениях приведены справки, отражающие результаты внедрения исследований.

Работа является завершенным научным исследованием и имеет важное народно-хозяйственное значение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях рекомендованных ВАК РФ:

1. Воронин В.А., Пивнев П.П., Воронин А.В. К вопросу контроля положения подводных и заиленных частей опор мостов. Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. 2006. Т. 67. № 12. С. 86-88.

2. Воронин А.В. Тарасов С.П., Кузнецов В.П. Использование приемных параметрических антенн в исследованиях характеристик водных акваторий. Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, №6 (95). – С.123 -126.

3. Воронин А.В., Кузнецов В.П. Исследование характеристик приемных параметрических антенн с управляемой в пространстве характеристикой направленности. Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, №6 (95). – С.126 -132

4. Воронин А.В., Тарасов С.П. Сканирование характеристик направленности приемной параметрической антенны в системах экологического мониторинга. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 122. № 9. С. 35-41.

5. Воронин А.В., Пивнев П.П. Применение многокомпонентных сигналов для повышения дальности действия гас с параметрическими антеннами в волноводах. Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 1 (90). С. 29-34.

6. Воронин А.В., Воронин В.А. Использование приемных параметрических антенн в средах с газовыми включениями. Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011, №9 (122). – С.30 -35.

7. Воронин А.В., Воронин В.А. Гидроакустическая гибкая протяженная приемная антенна для параметрического профилографа донных осадков. Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9 (146). С. 140-144.

8. Воронин А.В., Воронин В.А. Характеристики приемной параметрической антенны в кильватерной струе. Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9 (146). С. 144-148.

9. Воронин А.В., Воронин В.А. Особенности взаимодействия акустических волн в воздушной среде. Инженерный вестник Дона, №4 (2015) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3475.

Публикации в других изданиях:

10. Воронин В.А., Тарасов С.П., Воронин А.В. Параметрический профилограф с приемной параметрической антенной. Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» г. Санкт-Петербург., 2007-С.125-

11. Воронин А.В., Куценко Н.Н. Экологический мониторинг в статистически неоднородной водной среде. Сборник трудов III Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов ДонНТУ. Украина, Донецк, 2007. -С. 554-557.

12. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Тарасов С.П., Воронин А.В. Применение параметрических излучающих и приемных антенн для исследования океана. В кн. «Акустика океана». Доклады научной школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXI сессией Российского Акустического Общества. -М.: ГЕОС, 2009. -С. 234-238.

13. Воронин, А.В. Акустический параметрический приемник [Текст] / Максимов В.Н., Воронин А.В., Воронин В.А., Тарасов С.П., Максимова И.В. / Патент №2445642. Приоритет от 21.10.2010.

14. Воронин В.А., Тарасов С.П. Воронин А.В. Сканирование характеристики направленности в приемной параметрической антенне. Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. 2011. Т. 31. № 1. С. 61-64

15. Воронин А.В. Гибкая протяженная приемная антенна с фазовым детектированием сигнала в задачах экологического мониторинга. Материалы Шестой Всероссийской научной конференции «Экология 2011 – море и человек». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. 107 - 112

16. Воронин А.В., Воронин В.А., Тарасов С.П. Особенности характеристик приемных параметрических антенн в средах с дисперсией. В кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010 – 2012 / Под ред. Белого Ю.И.. – М.: Радиотехника, 2011.-С. 799 – 806.

17. Пивнев П.П., Котляров В.В., Чаус Т.А., Воронин А.В. Гидроакустические антенны локаторов, предназначенных для исследования морского дна. В кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010 – 2012 / Под ред. Белого Ю.И.. – М.: Радиотехника, 2011.-С. 806 – 811.

18. Воронин А.В., Воронин В.А. Исследование характеристик направленности параметрических антенн в дисперсных средах. Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2012.С. 121-124

19. Воронин А.В., Воронин В.А. Гидроакустическая приемная протяженная антенна. Международный научно-исследовательский журнал. Часть 1. Под ред. Миллера А.В. - Екатеринбург 2013.-С. 5 – 6.

20. Воронин А.В., Воронин В.А., Дягтеренко К.К. Некоторые особенности взаимодействия акустических волн в воздушной среде. Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50». Сборник трудов. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2015. – 252

21. Воронин В.А., Чернов Н.Н., Воронин А.В. Исследование гидроакустических систем, предназначенных для обнаружения гидробионтов. Современные технологии и развитие политехнического образования: Международная научная конференция, г. Владивосток, 2016, -С. 752-756

22. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П., Воронин А.В. Построение широкополосных антенн систем передачи данных малогабаритных автономных подводных аппаратов. В кн. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2015 – 2017 / Под ред. Белого Ю.И.. – М.: Радиотехника, 2016.-С. 779 – 790.

В работах опубликованных в соавторстве лично автору принадлежат: в [1,8,10,13] – теоретические исследования использования разных частот волн накачки для поворота характеристики направленности приемной параметрической антенны; [2 - 6, 14, 18] – формирование характеристик направленности приемных параметрических антенн в системах исследования водных акваторий; [9] – использование многокомпонентных сигналов в волноводах для формирования веера статических характеристик направленности в приемной параметрической антенне; [7, 16] - теоретические исследования эффективности взаимодействия волн в воздушной среде; [11, 15, 17] – обоснование применения антенны бегущей волны с изменяющейся частотой накачки для поворота характеристики направленности; [19 - 21] – теоретическое обоснование приемной параметрической антенны локаторного типа для систем передачи информации и поиска шумящих объектов; [22] – построение приемной параметрической антенны с звукопрозрачным волноводом для поворота характеристики направленности.