

Параметрические широкополосные системы мониторинга и связи в гидроакустике

П.П. Пивнев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Рассмотрены гидроакустические параметрические системы мониторинга и связи. Приведено краткое описание разработанных на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (ЭГАиМТ ИНЭП ЮФУ) наиболее перспективных гидроакустических систем с параметрическими излучающими антеннами. Представлен внешний вид и диаграммы направленности (ДН) различных вариантов исполнения преобразователей накачки параметрических антенн малогабаритных профилографов. Приведена конструкция составного преобразователя накачки и ДН параметрического сейсмопрофилографа. Приведено описание параметрического гидролокатора бокового обзора и гидролокатора траверзного обзора. Кроме того, рассмотрены параметрические системы гидроакустической связи и мониторинга моря на протяженных трассах.

Ключевые слова: гидроакустическая параметрическая система, параметрическая антенна, система передачи данных, широкополосная антенна, мониторинг акватории, параметрический профилограф, параметрическая система навигации, траверзный обзор.

Введение

Системы связи и мониторинга в гидроакустике в последнее время бурно развиваются. Однако существует ряд преград для их эффективного использования. В связи требуется передача большого количества информации с большой скоростью, а при проведении мониторинга инженерных подводных сооружений необходима высокая разрешающая способность по дальности и большая дальность действия системы. При существующем положении дел эти требования невозможно удовлетворить из-за применения в системах узкополосных излучателей и приемников ультразвуковых волн. Кроме того, мониторинг инженерных сооружений требует наблюдение не только подводной их части, но и расположенных под слоем грунта и ила частей сооружений.

Традиционно для таких работ используют гидролокаторы бокового обзора, многолучевые эхолоты и профилографы. Современные методы решения многих задач гидроакустики, в том числе передачи информации по гидроакустическому каналу, исследования характеристик морской среды,

обнаружения гидрофизических и техногенных неоднородностей, наблюдения за ними и т.д., могут быть более эффективными при построении гидроакустических систем с широкополосными и сверх широкополосными сигналами для повышения разрешающей способности по дальности, а дальность действия систем увеличивать применением сложных сигналов с последующей их обработкой. Мониторинг частей инженерных сооружений, расположенных пол слоем грунта и ила возможен с использованием параметрических профилографов, принцип работы которых основан на нелинейном взаимодействии ультразвуковых сигналов в нелинейной среде – воде.

Ранее считалось, что малая эффективность преобразования энергии волн накачки в энергию волн, генерируемых в нелинейной среде, ограничивает область применения гидроакустических систем с излучающими параметрическими антеннами. Однако многочисленные исследования процессов нелинейной генерации волн нелинейной среде, проведенные на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (ЭГАиМТ ИНЭП ЮФУ) совместно с ведущими организациями-партнерами: АО «НИИП имени В.В.Тихомирова»; АО «Акустический институт им. академика Н. Н. Андреева»; Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал; ООО «НЕЛАКС», позволили создать образцы гидроакустических параметрических систем и провести натурные испытания и эксперименты по применению их в различных областях гидроакустики. В результате выявились наиболее перспективные гидроакустические системы с параметрическими излучающими антеннами. Это:

- малогабаритные параметрические профилографы, предназначенные для исследования дна и верхнего слоя придонных осадков;

- параметрические сейсмопрофилографы, применяемые для профилирования верхнего слоя грунта для проведения геофизических исследований и мониторинга инженерных сооружений;

- параметрические гидролокаторы бокового обзора (многолучевые параметрические профилографы), для увеличения производительности поисковых работ,

- параметрические гидролокаторы траверзного обзора, для поиска биоресурсов на мелководье;

- параметрические гидроакустические системы мониторинга моря на протяженных трассах;

- параметрические гидроакустические системы передачи информации (ПГСП) в водной среде;

- параметрические гидроакустические системы навигации и управления движением автономных подводных аппаратов (АНПА).

Расширение областей применения гидроакустических систем с параметрическими антеннами удалось достичь, благодаря их уникальным характеристикам, с трудом достигаемым в традиционных системах. К этим характеристикам относятся:

- широкий диапазон рабочих (разностных) частот, что позволяет применять сложные и широкополосные сигналы;

- высокая разрешающая способность по углу, за счет высокой направленности антенны в режиме излучения;

- высокая разрешающая способность по дальности, за счет излучения широкополосных сигналов;

- постоянство ширины характеристики направленности антенны во всем диапазоне рабочих частот, за счет особенностей формирования излучения сигналов на генерируемых частотах;

- высокая помехоустойчивость, за счет очень малого уровня бокового излучения параметрической антенны;
- малые габариты, а, следовательно, и вес антенны накачки;
- и другие, в настоящее время мало применяемые параметры [1].

Ниже приведем краткое описание приведенных выше систем, разработанных на кафедре ЭГАиМТ ИНЭП ЮФУ.

Малогабаритные параметрические профилографы

Малогабаритные профилографы широко применяются для решения актуальных задач:

- в геологии, геоакустике и сейсмоакустике на шельфе моря, связанных с исследованием и анализом донных структур;
- поиска полезных ископаемых, определения структуры дна для строительства инженерных гидросооружений;
- диагностики и мониторинга подводных инженерных сооружений;
- оценки сапропелевых накоплений во внутренних водоемах для определения перспективности добычи при производстве органических удобрений, оценки иловых загрязнений для экологического контроля;
- гидроакустического поиска, картографирования и музеефикации подводного культурного наследия.

Разностные (рабочие) частоты таких локаторов лежат в диапазоне от 5 до 30 кГц, глубина проникновения в грунт до 30-50 метров (зависит от типа грунта), ширина характеристики направленности единицы (2-5) градусов.

Для решения указанных выше актуальных задач на шельфе моря, связанных с исследованием и анализом донных структур, все чаще применяются подводные и надводные необитаемые аппараты с установленным гидроакустическим оборудованием. Небольшие массогабаритные характеристики параметрических узколучевых

профилографов позволяют успешно их использовать на необитаемых аппаратах (подводных и надводных) [4].

На рис. 1 приведены варианты исполнения антенн накачки малогабаритных параметрических профилографов, разработанные на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники Южного федерального университета.

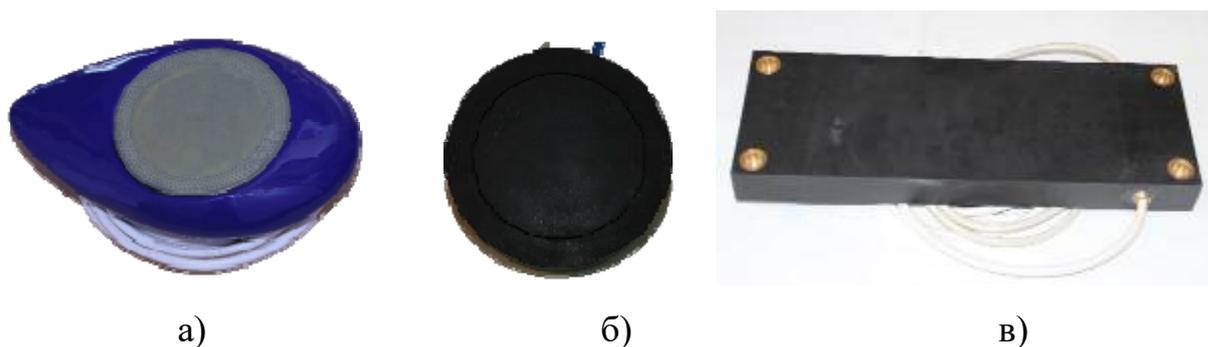


Рис. 1. – Антенны параметрического профилографа: а) в обтекателе, забортное исполнение; б) без обтекателя, забортное исполнение; в) для необитаемых аппаратов.

Разработанные и изготовленные параметрические профилографы имеют следующие параметры: длительность импульса – 8мс, полоса рабочих (разностных) частот 7-21 кГц, вид сигнала – тон, широкополосные сигналы. Ширина характеристики направленности – 3-4 градуса во всем диапазоне рабочих частот. Средняя частота волн накачки – 140 кГц [2].

На рис. 2 приведены экспериментально измеренные в гидроакустическом бассейне характеристика направленности антенны на частоте накачки (140 кГц) (рис. 2а) и на разностных частотах (рис. 2б - 2г).

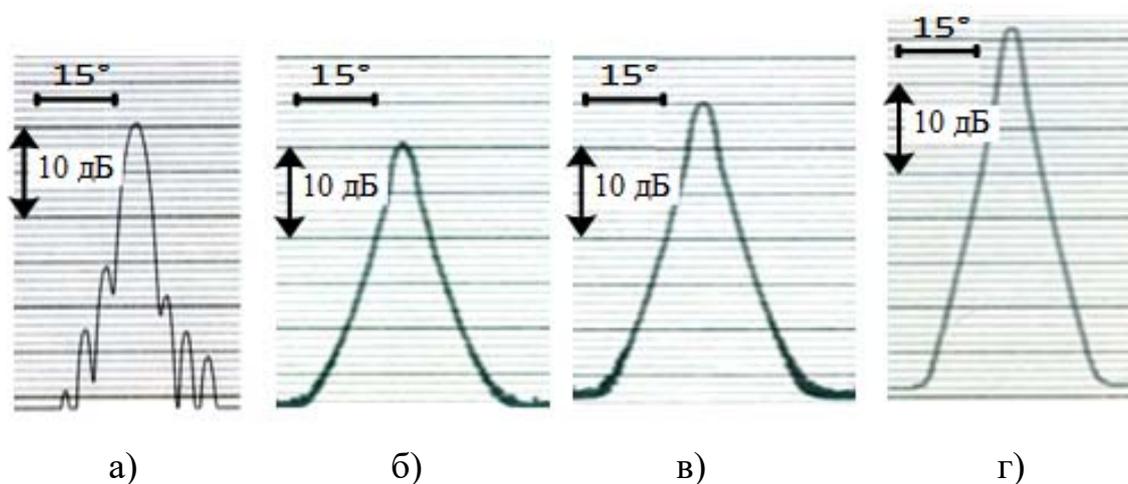


Рис. 2. – Характеристики направленности антенны:

а) - на частотах накачки; б) – на разностной частоте 10 кГц; в) – на разностной частоте 15 кГц; г) – на разностной частоте 20 кГц;

Параметрические сейсмопрофилографы

Это относительно новый вид профилографов. Разностные (рабочие) частоты лежат в диапазоне от 300 Гц до 10 кГц, при этом глубина проникновения в грунт достигает 500 метров (зависит от типа грунта). Ширина характеристики направленности несколько (2-5) градусов. Такие сейсмопрофилографы позволяют детально исследовать тонкую структуру дна на шельфе и в устьях рек при проведении различного рода исследований шельфовой зоны.

Результаты расчетов геометрических размеров антенны и отдельных преобразователей, представленные в [3]. В состав антенны накачки параметрического профилографа с центральной частотой накачки 30 кГц входит 800 пьезоэлементов с излучающей поверхностью 80x8 мм. Разностные (рабочие) частоты антенны 0,3-10 кГц при постоянной характеристике направленности 3x3 градуса. При этом размеры антенны 1x1 м. Конструктивной особенностью антенны является разделение ее на 10

отдельных модулей, что позволяет упростить технологию производства и установки на судно.

Каждый модуль имеет в своем составе элементы, работающие на разных частотах накачки, расположенные в порядке чередования типов. Составляющие антенну модули являются составными герметичными элементами, имеющими отдельные кабельные вводы. Конструкция антенны накачки низкочастотного параметрического профилографа показана на рис.3. Модули антенны закрепляются на несущей раме.

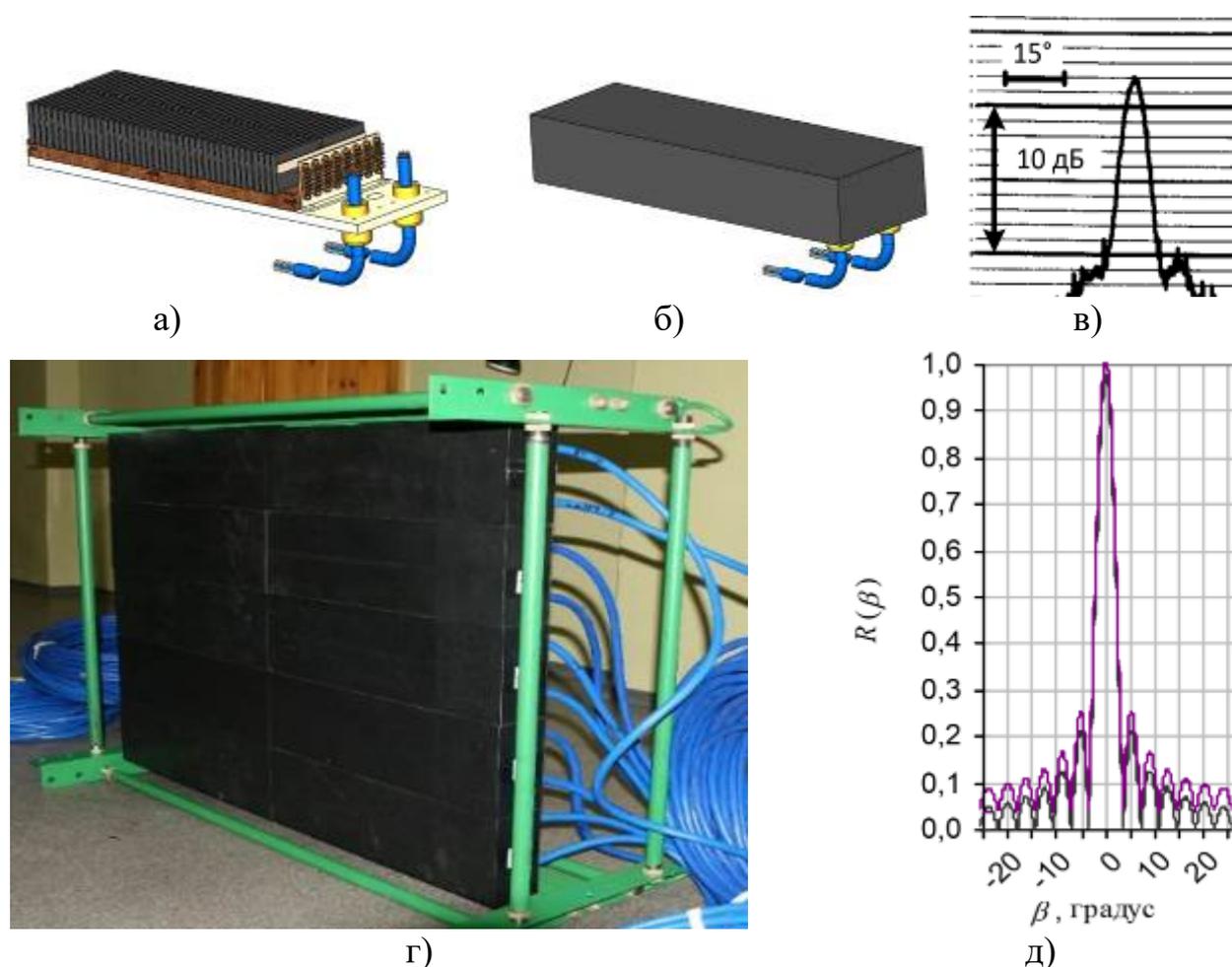


Рис.3. – Антенна накачки параметрического сейсмопрофилографа
а) - 3D-модель без герметизирующего компаунда; б) - 3D-модель с герметизирующим компаундом; в) – ДН на разностной частоте 3 кГц;
г) – антенна накачки с несущей рамой; д) – ДН антенны на частоте накачки

Антенна разбита на 200 каналов (по 100 на каждую частоту накачки), что позволяет электронно стабилизировать луч при качке судна.

Параметрические гидролокаторы бокового обзора (многолучевые параметрические профилографы)

Параметрические гидролокаторы бокового обзора открывают новые перспективы в технологиях поиска и классификации затонувших объектов. Такие гидролокаторы позволяют проводить масштабные исследования толщи грунта и получать дополнительную информацию о физических свойствах грунтов необходимых для классификации донных отложений.

Разработанный параметрический гидролокатор бокового обзора с рабочими (разностными) частотами от 5 до 30 кГц, глубиной проникновения в грунт до 30 метров (зависит от типа грунта), при полосе обзора до ± 20 градусов.

Использование параметрических профилографов бокового обзора со сложными сигналами, позволяет производить с высокой точностью исследования структуры верхней части осадочного чехла и оценивать физические свойства морских осадков. Для подводного поиска и наблюдения с помощью сложных сигналов удастся расширить зону обнаружения (за счет увеличения дальности действия). Конструкция разработанного гидролокатора позволяет использовать для зондирования ортогональные сигналы, что значительно повышает информативность полученных данных.

Параметрические гидролокаторы траверзного обзора

В настоящее время для обнаружения и мониторинга биоресурсов на мелководье используются только эхолоты (вертикальная локация), при этом зона обзора водного пространства очень ограничена. При малых глубинах существенно сказывается на поведении рыб «отпугивающий эффект» при движении судна. Применение приборов горизонтальной локации («обычных»

гидролокаторов) со значительно большей зоной обзора крайне неэффективно из-за плохой помеховой обстановки, обусловленной реверберацией и многократными отражениями акустических сигналов от дна и поверхности [6, 15].

Применение гидролокатора траверзного обзора позволит рыбакам и гидробиологам значительно повысить производительность поиска объектов лова и проведения мониторинга биоресурсов и гидробионтов за счет существенного увеличения размеров обследуемой зоны (в десятки раз больше по сравнению с эхолотами) [13].

Параметрические гидролокаторы траверзного обзора. Разностные (рабочие) частоты лежат в диапазоне от 5 до 50 кГц, с дальностью обзора пространства до 1000 – 1500 метров, в том числе в условиях мелководья. Область применения таких систем весьма широка - это и экологический мониторинг акватории, и поиск объектов (поиск рыбных скоплений, подводных пловцов и др.) в толще воды, в том числе на мелководье. При этом ширина характеристики направленности таких систем составляет: по вертикали несколько (2-6 град), по горизонтали от 2 до 40 градусов.

В ООО «НЕЛАКС» совместно с кафедрой ЭГА и МТ ИНЭП ЮФУ разрабатывается система траверзного обзора. На рис.4 представлен внешний вид и ДН антенны накачки. Антенна накачки параметрического гидролокатора состоит из 6 модулей в каждом из которых располагается две частотные подрешетки.

При мониторинге мелководных водоемов с применением широкополосных сигналов на больших расстояниях (при траверсном обзоре) необходимо учитывать наличие в среде геометрической и физической дисперсии. Наличие физической и геометрической дисперсии необходимо учитывать при выборе диапазона рабочих частот [10].

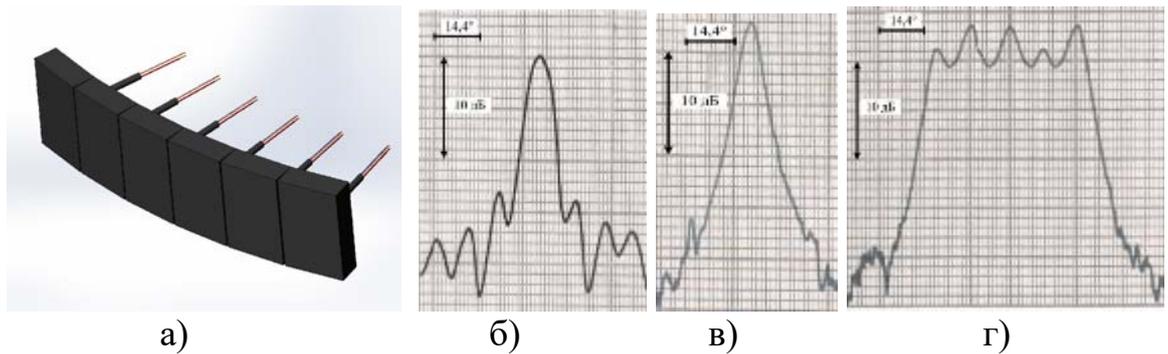


Рис.4. – Антенна накачки гидролокатора траверсного обзора

- а) внешний вид антенны; б) ДН 1 модуля на частоте накачки 250 кГц;
в) ДН 1 модуля на разностной частоте 30 кГц; г) ДН антенны из 6 модулей на разностной частоте 30 кГц;

Таким образом, определение количества биоресурсов актуальная и сложная научно-техническая задача, как с точки зрения продовольственной безопасности страны, так и с точки зрения экологического мониторинга водоема. Одним из основных направлений морской деятельности России на ближайшую перспективу является освоение Мирового океана, как наиболее перспективного источника природных ресурсов, в том числе биоресурсов. Параметрические гидролокаторы траверсного обзора являются перспективным инструментом, способным существенно повысить производительность поиска и мониторинга биоресурсов на мелководье. Помимо этого, гидролокаторы траверсного обзора целесообразно применять и при охране акватории.

Параметрические гидроакустические системы мониторинга моря на протяженных трассах

Области применения параметрической системы стационарного типа могут быть различными. Параметрические антенны с мощным высоконаправленным широкополосным излучением (антенны на основе нелинейных эффектов), являются перспективным инструментом, способным предоставлять новые возможности для акустического зондирования в океане,

особенно в морском волноводе. [5-6].

Методы параметрического излучения представляют возможность селективного возбуждения мод в широкой полосе частот (2–3 октавы). При этом излучаемый широкополосный сигнал может быть идеально согласован со слоистой структурой морской среды [11].

Применение высоконаправленных параметрических широкополосных антенных систем апробировано в Азовском и Черном морях. В экспериментах принимали участие специалисты АО "Акустический институт им. академика Н. Н. Андреева", кафедры ЭГАиМТ ИНЭП ЮФУ и ООО «НЕЛАКС». Был создан макет высокочастотного параметрического широкополосного излучателя.

Эксперимент проводился в акватории Таганрогского залива Азовского моря. Место проведения эксперимента выбиралось таким образом, чтобы по трассе распространения не было больших перепадов глубин и донный грунт был однородный по всей длине волновода. Выбор трассы распространения осуществлялся с использованием гидролокатора бокового обзора «Галс» и параметрического профилографа ПГЛ-101.

На дне водоема устанавливалось поворотно-выдвижное устройство с параметрическим широкополосным узконаправленным преобразователем накачки. Приемная система состояла из шести приемных цилиндрических гидрофонов, расположенных на штанге-треноге, устанавливаемой на дне. Для определения точного местоположения треноги с гидрофонами и излучающей антенны использовались приемники DGPS. Приемники DGPS также использовались для приема сигналов точного времени для синхронизации излучающего и приемного трактов.

Излучающая система с обеспечивающим судном оставалась на одном месте во время проведения эксперимента, а приемная система с обеспечивающим судном перемещалась по волноводу, для увеличения

дистанции между приемником и излучателем. Эксперименты проводились на дистанциях от 0,5 км до 6 км.

Результаты эксперимента достаточно хорошо совпали с теоретическими расчетами, что говорит о перспективах применения полученной модели расчета в аналогичных системах.

Продолжением работ в этом направлении стало создание полномасштабной экспериментальной станции для дистанционного зондирования морских акваторий на протяженных трассах. На рис. 5 представлен внешний вид многоканальных усилителей мощности (рис. 5б) и антенна накачки (рис 5а) [11].

С помощью разработанной параметрической антенны предполагается организовать стационарные акустические трассы для исследования гидрофизических характеристик Черного моря. Разработанная мощная параметрическая антенна находится в Сухумском гидрофизическом институте для испытаний на Черном море. Ее возможности позволяют исследовать гидрофизические характеристики Черноморского полигона в акватории от кавказских берегов Черного моря до Крыма на трассах, протяженностью свыше 500 км. Разработанная параметрическая антенна имеет частоту накачки 20 кГц, что позволяет наиболее эффективно излучать параметрический сигнал в частотной полосе 300–3000 Гц. Основные размеры антенны 2 м (высота) × 0.7 м (ширина) обеспечивают узкую характеристику направленности шириной на уровне 0.7 по давлению 2° в вертикальной плоскости и 8° в горизонтальной плоскости, постоянную во всем частотном диапазоне. Антенна рассчитана на работу в импульсном режиме с импульсами регулируемой длительности до 100 мс.

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



Рис. 5. – Гидроакустическая параметрическая система мониторинга океана на протяженных трассах

а) – антенна накачки; б) – 24 канальный усилитель мощности

Таким образом, излучающая параметрическая антенна, согласованная с морским волноводом, открывает возможность использовать методы частотной томографии вместо пространственной томографии. Это новое качество параметрической антенны создает дополнительные возможности для мониторинга морских акваторий на протяженных трассах. Селективное возбуждение мод в широкой полосе частот в волноводах представляется наиболее эффективным инструментом для исследований сжатия акустических сигналов в морских волноводах, реализации виртуальных акустических барьеров, построения систем подводной навигации и управления движением подводных аппаратов и систем, создания высокоэффективных систем зондирования моря с целью обнаружения погруженных объектов и неоднородностей.

Параметрические гидроакустические системы передачи информации в водной среде, навигации и управления движением автономных подводных аппаратов (АНПА)

Параметрические системы являются перспективным инструментом, способным передавать информацию на значительные расстояния в условиях мелководья.

На кафедре ЭГАиМТ создан высокочастотный макет системы связи (рис.6) и проведены экспериментальные лабораторные исследования в условиях измерительного гидроакустического бассейна.

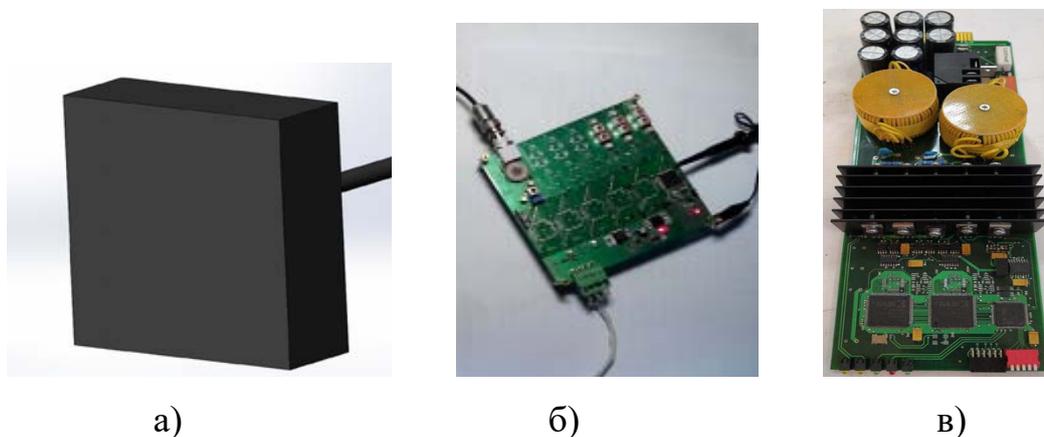


Рис. 6. – Макет системы связи

а) преобразователь накачки; б) плата приема; в) плата усилителя мощности с формирователем

Ниже приведена сводная таблица результатов эксперимента макета системы связи (табл. 1).

Приведенные результаты экспериментальных исследований и испытаний разработанных и изготовленных элементов макетных образцов систем гидроакустической связи показали перспективность их использования в качестве гидроакустических модемов.

Таблица №1

Результаты натурных испытаний макетного образца связи

Длина блока данных	Среднее время передачи данных	Среднее скорость передачи данных	Количество блоков данных	Количество ошибок
байт	мс	байт/с	шт.	шт.
32	169	188	500	4
64	237	269	500	7
128	427	297	500	9

Еще одной областью возможного применения высоконаправленной широкополосной параметрической антенны является решение задач дальней звукоподводной связи, навигации и управления движением автономных подводных аппаратов. Передвигаясь в пределах узкого луча излучающей параметрической антенны малоразмерные автономные подводные аппараты, оборудованные соответствующими гидроакустическими приемниками, могут по типу принципа равносигнальной зоны направляться лучом вдоль заданной траектории. Дальность управления по такому принципу может достигать десятков и даже сотен километров [10].

Данный метод является перспективным при решении различного рода задач с применением необитаемых автономных подводных аппаратов.

Заключение

Параметрические гидроакустические системы с широкополосными сигналами являются перспективным инструментом исследования Мирового океана. Некогда новое направление нелинейной гидроакустики в настоящее время широко развивается, появляются новые системы и комплексы поиска, мониторинга и диагностики водной среды и донного грунта, а также передачи информации на большие расстояния в водной среде, в том числе на мелководье. Малогабаритность параметрических систем позволяет их

применять не только на различных судах (в том числе маломерных), но и на необитаемых аппаратах. А постоянство ширины диаграммы направленности в широком диапазоне частот и отсутствие боковых лепестков делает гидроакустические системы с параметрическим режимом работы практически незаменимым инструментом для исследования мелководных районов Мирового океана.

Литература

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. - 416 с.
2. Pivnev, P.P., Voronin, V.A., Tarasov, S.P., Soldatov, G.V. The application features of sonar systems for control of underwater engineering structures and monitoring area (2018) Exploration and Monitoring of the Underwater Environment of the Shelf Zone, pp. 267-291. DOI: 10.1002/9781119488309.ch9.
3. Воронин В.А., Тиссенбаум Ю.Л., Усов В.П. Исследование антенны накачки параметрического профилографа // Нелинейные акустические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2008. - С. 38-49.
4. Элбакидзе А.В., Каевицер В.И., Смольянинов И.В., Пивнев П.П., Тарасов С.П., Воронин В.А. Автономные комплексы для исследования дна и донных отложений мелководных водоемов // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2018. - № 6 (200). - С. 6-18.
5. Новиков Б.К. Руденко О.В. Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. - Ленинград: Судостроение, 1981. - 264 с.
6. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics. (Stockholm, Sweden, 7—10 July 2008). P. 393.
7. Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В. А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акустический журнал. -

2009. - №№1 (55). - С. 56-61.

8. Чарнотский М.И., Фукс И.М., Наугольных К.А., Смирнов А.В., Ди Иорио Д., Есипов И.Б. Экспериментальная проверка акустического двухчастотного метода мониторинга поперечных течений // Акустический журнал. - 2006. - №№2 (52). - С. 269-274.

9. Бреховских Л. М., Лысанов Ю.Л. Теоретические основы акустики океана. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.

10. Есипов И.Б., Иоханнессен О.Н., Наугольных К.А., Уанг Ю.Ю., Шанг И.С. О применении параметрического излучателя для мониторинга пролива Фрама // Акустический журнал. - 1999. - №4 (45). - С. 504-511.

11. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). p. 325.

12. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. - Ленинград: Судостроение, 1973, - 275 с.

13. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. – Ленинград: Судостроение, 1986. - 287 с.

14. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // Радиотехника, 2008. - № 8. - С.35-42.

15. Мосолов С.С., Скняря А.В., Тутынин Е.В, Залогин Н.Н. Некоторые аспекты и перспективы применения сложных сигналов в гидроакустике // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН, 29 ноября - 3 декабря 2010. - С. 170-174.

16. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Широкополосные гидроакустические антенны систем экологического мониторинга водной



среды и придонных осадочных пород // Инженерный вестник Дона, 2015. - №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476.

17. Каевицер В.И., Пивнев П.П., Тарасов С.П., Элбакидзе А.В. Гидроакустическая система со сложными сигналами для связи и позиционирования подводных аппаратов // Инженерный вестник Дона, 2019. - №1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5597>.

References

1. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. *Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy* [Hydroacoustic parametric systems]. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2004. 416 s.

2. Pivnev, P.P., Voronin, V.A., Tarasov, S.P., Soldatov, G.V. The application features of sonar systems for control of underwater engineering structures and monitoring area (2018) *Exploration and Monitoring of the Underwater Environment of the Shelf Zone*, pp. 267-291. DOI: 10.1002/9781119488309.ch9.

3. Voronin V.A., Tissenbaum Ju.L., Usov V.P. *Nelinejnye akusticheskie sistemy* [Nonlinear acoustic system]. Rostov-na-Donu, 2008. pp. 38-49.

4. Jelbakidze A.V., Kaevicer V.I., Smol'janinov I.V., Pivnev P.P., Tarasov S.P., Voronin V.A. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*. 2018. № 6 (200). pp. 6-18.

5. Novikov B. K. Rudenko O. V. Timoshenko V. I. *Nelinejnaya gidroakustika* [Nonlinear underwater acoustics]. L.: Sudostroenie, 1981. 264 p.

6. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. *Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics*. Stockholm, Sweden, 7—10 July 2008. p.393

7. Esipov I. B., Popov O. E., Voronin V. A., Tarasov S. P. *Akusticheskij zhurnal*. 2009. T. 55. № 1. p. 56.

8. Charnotskij M.I., Fuks I.M., Naugol'nyh K.A., Smirnov A.V., Di Iorio D., Esipov I.B. *Akusticheskij zhurnal*. 2006. №№2 (52). pp. 269-274.



9. Brekhovskih L. M., Lysanov YU. . Teoreticheskie osnovy akustiki okeana [Theoretical bases of acoustics of the ocean]. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 264 p.
 10. Esipov I.B., Iohannessen O.N., Naugol'nyh K.A., Uang Ju.Ju., Shang I.S. Akusticheskij zhurnal. 1999. №4 (45).pp. 504-511.
 11. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). p. 325.
 12. Smaryshev M.D. Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn [Directivity of sonar antennas]. Leningrad: Sudostroenie, 1973, 275 p.
 13. Kobjakov Ju.S., Kudrjavcev N.N., Timoshenko V.I. Konstruirovaniye gidroakusticheskoy rybopoiskovoy apparatury [Design of hydroacoustic fish-searching equipment]. Leningrad: Sudostroenie, 1986. 287 p.
 14. Kaevicer V.I., Razmanov V.M., Krivcov A.P., Smol'yaninov I.V., Dolotov S.A. Radiotekhnika, 2008. № 8. pp.35-42.
 15. Mosolov S.S., Sknarya A.V., Tutynin E.V, Zalugin N.N. Nekotorye aspekty i perspektivy primeneniya slozhnykh signalov v gidroakustike. IV Vserossiyskaya konferenciya «Radiolokaciya i radiosvyaz'» [Some aspects and the prospects of application of the difficult signals in an underwater acoustics. The IV All-Russian conference "Radar-location and Radio Communication"]. M.: IREH RAN, 29 noyabrya - 3 dekabrya 2010. pp. 170-174.
 16. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476.
 17. Kaevicer V.I., Pivnev P.P., Tarasov S.P., Jelbakidze A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019. №1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5597>.
-