

УДК 623.983:006.354; 534.222.2

© Е. В. Волощенко, 2024

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ НА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ

Предложено обеспечивать безопасность прибрежных сооружений за счет проведения многопозиционного мониторинга водного объема акватории охранной зоны с помощью гидроакустических средств, при проектировании антенн которых используют эффекты нелинейной акустики, в частности самовоздействие и взаимодействие ультразвуковых (УЗ) волн накачки. Проведен анализ применения гидроакустических систем активной локации с приемоизлучающими антенными устройствами оригинальной конструкции, которые размещают на дне мелководной акватории и используют для обнаружения надводных и подводных объектов, а также удаленного получения информации о гидроусловиях в различных точках акватории. Представлены расчетные результаты оценки энергетической дальности действия гидроакустической системы активной локации в режиме параметрического излучения и анализ пространственных характеристик макета рассмотренного антенного устройства, которые подтверждают возможность получения заявляемого результата.

Кл. сл.: ультразвуковой мониторинг мелководного объема, охранная зона акватории, параметрическая излучающая антенна

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время организация охраны различных объектов, например мостовых сооружений стратегического назначения, со стороны акватории включает в себя применение гидроакустических средств обнаружения подводных/надводных объектов [1–3]. Общие технические требования и методы испытаний охранных гидроакустических систем для защиты объектов морского (речного) и прибрежного базирования со стороны прилегающей акватории изложены в [4].

Рассмотрим имеющиеся сообщения по обсуждаемой проблеме. Известен способ обнаружения подводных объектов [5] в мелком море, заключающийся в размещении на донной поверхности в виде барьерной линии с известными координатами — морского рубежа из N приемоизлучающих интерференционных антенн с собственной резонансной частотой f_N , — что обеспечивает как моностатическую, так и бистатическую схемы эхопоиска в объеме облучаемой пространственной полосы. Достоверность и непрерывность контроля облучаемой водной полосы без зон неуверенного приема обеспечивает применение как "разночастотной окраски" соседних областей полосы, так и моностатический/бистатический прием ультразвуковых (УЗ) эхо-сигналов с различными частотами с помощью групп из трех соседних интерференционных антенн. К недостаткам способа сле-

дует отнести отсутствие пассивного режима шумопеленгования, ненаправленный режим как излучения, так и приема интерференционных антенн при обзоре полосы охраняемой акватории. В данном случае режим работы ("излучение-прием" — обследованный "квант" водного полупространства) обуславливает как отсутствие угловых элементов разрешения в обеих плоскостях, так и неэффективность использования УЗ-энергии при излучении. Проблемой также является наличие зон неуверенного обнаружения объектов вблизи границ раздела, причем задача оперативного обнаружения и определения местоположения одновременно нескольких подводных целей в водном объеме не реализована.

Метод обнаружения и определения местоположения подводных нарушителей в прибрежных морских областях, руслах рек, каналах, озерах при осуществлении охраны подводных сооружений, например опор мостов, судов на стоянке, платформ и т.д., рассмотрен в [6]. Особенностью способа является формирование зоны контроля шириной 100–200 м на мелководной акватории при входе в порт или бухту за счет использования подводной пространственно-распределенной интерференционной антенны. В данном случае антенное устройство должно обеспечивать в azimuthальной плоскости зоны водного объема — секторное облучение (один излучатель) — и ненаправленный прием эхо-сигналов для определения координат

пеленгуемого объекта (три приемника). Для снижения уровней реверберационных помех от водной поверхности и дна предполагается, что в угломестной плоскости антенное устройство будет обеспечивать УЗ-излучение/прием узким основным лепестком характеристики направленности (ХН). Это достигается за счет большого вертикального размера апертур излучателей/приемников, однако не решает проблему наличия зон неуверенного обнаружения объектов вблизи границ раздела. Расширение зоны контроля предлагается осуществлять за счет увеличения количества как приемников, так и излучателей, что будет сопровождаться возникновением помех взаимного влияния, потребуем различной "частотной окраски" зондирующих сигналов, т.е. наличия наборов, отличающихся друг от друга конструкцией излучателей/приемников. В [6] задача оперативного обнаружения и определения местоположения одновременно нескольких подводных целей в водном объеме также не обсуждается.

Отметим, что тактическим преимуществом гидролокационных систем горизонтального действия является наличие обширной зоны обзора, что позволяет получать больше информации о подводной обстановке. Однако, как следует из рассмотренного выше, возникают реверберационные помехи за счет излучения/приема УЗ-энергии в направлениях боковых лепестков ХН антенн. Недостатком антенн, функционирующие и просторанственная избирательность которых определяется явлением интерференции, является ограниченная резонансная полоса пропускания, т.е. небольшой диапазон рабочих УЗ-зондирующих сигналов.

ГИДРОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С РЕЖИМОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (РПИ) НИЗКОЧАСТОТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

Одним из перспективных направлений проектирования антенн гидролокационных систем для расширения диапазона рабочих сигналов при уменьшении как бокового поля излучения при достаточно узком основном лепестке, так и массогабаритных величин является учет нелинейности упругих свойств воды. В данном случае происходит генерация в водной среде дополнительных НЧ- и ВЧ-спектральных компонент при распространении мощного зондирующего сигнала, излученного антенным устройством, например сигнала разностной частоты (СРЧ) $F_- = |f_1 - f_2|$ при двухчастотном сигнале накачки f_1, f_2 . Режим параметрического излучения (РПИ) зондирующих сигналов разностной (СРЧ) $F_- = |f_1 - f_2|$, или суммарной (ССЧ) $f_+ = f_2 + f_1$ частот, или высших гар-

моник nf_1, nf_2 позволяет применять для реализации антенн малогабаритные резонансные электроакустические преобразователи (ЭАП), в полосу пропускания которых входят частоты $f_{1,2}$ ($f_{1,2} \gg F_-$) волн накачки.

Обсудим имеющиеся сообщения. Система гидролокации для обнаружения, определения местоположения и параметров движения цели в заданном секторе (подходные каналы бухт, портов, акватории гидро- и атомных станций), причем с реализацией подводного звуковидения, предложена в [7]. Предполагается, что при продольном зондировании водного объема антенное устройство, в котором реализован режим параметрического излучения (РПИ), обеспечит совмещение дальнего обнаружения объекта (СРЧ $F_- = |f_1 - f_2| = 50$ кГц) при последующей ближней идентификации за счет получения УЗ-изображения (сигналы накачки $f_1, f_2 = 400$ и 450 кГц). По мнению автора, локационная система, имея антенное устройство из трех элементов — излучающий сигналы накачки и два приемных для эхо-сигналов на НЧ и ВЧ, — может быть использована при охране береговых объектов или стоящих надводных судов на мелководье, т.е. при наличии различных границ раздела в гидроакустическом канале лоцирования. Однако учет их маскирующего влияния, например, в конструкции антенн не отражен: то, что для обеспечения направленного приема отраженных СРЧ ее апертура должна быть на порядок больше, чем для приема сигналов накачки.

Для обнаружения целей, медленно движущихся в горизонтально протяженном водном объеме на шельфе, предложена [8] опускаемая с вертолета малогабаритная приемоизлучающая антенна для мобильной гидроакустической системы с моностатическим/бистатическим шаговым эхопоиском как в азимутальной, так и угломестной плоскостях, причем для формирования НЧ зондирующих импульсов используется РПИ. В качестве приемных элементов применяются вертикально или горизонтально расположенные приемные линейные антенны, например, локализованные в области излучения (моностатическая схема) или удаленные (бистатическая схема), которыми снабжены расположенные поблизости радиогидроакустические буи. К недостаткам данной гидроакустической системы следует отнести высокий уровень маскирующей шумовой помехи, обусловленный использованием мобильного носителя — вертолета. При моностатической схеме эхо-поиска сложности с конструкцией приемной антенны на НЧ не решены.

Гидроакустическая система активной локации для моностатического/бистатического УЗ эхо-поиска в водном полупространстве над ними, содержащая

как минимум два придонных приемоизлучающих антенных устройства (ПАУ), предложена в [9]. Излучающие и приемный элементы каждого антенного устройства распределены сверху вниз по вертикали вдоль ее нормально установленной относительно дна стойки, включая в себя соответственно:

1) высокочастотный (ВЧ) "вверхсмотрящий" излучатель, расположение акустической оси которого может ступенчато изменяться оператором в двух плоскостях, что позволяет облучать при эхо-поиске водный объем как снизу, так и сверху за счет отражения от границы раздела "вода – воздух";

2) параметрическую излучающую антенну (ПИА), использование которой обеспечивает импульсный режим облучения водной среды СРЧ в диапазоне 2–6 кГц, причем за счет "шагового" сканирования основным лепестком с угловой шириной 6° в азимутальной плоскости;

3) вертикально расположенную приемную линейную антенну, коммутация ЭАП которой позволяет направленно принимать эхо-сигналы при выборе максимального отношения сигнал/шум.

К сожалению, в [9] отсутствуют сведения о громоздкой конструкции придонного ПАУ, позволяющего реализовать предложенный способ. ПИА применена только в режиме формирования зондирующих СРЧ, в то время как более эффективно генерируемые ВЧ-компоненты — сигнал суммарной частоты (ССЧ) $f_+ = (f_1 + f_2)$ и высшие гармоники nf_1, nf_2 сигналов накачки — для ближней локации не используются.

АНТЕННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КВАНТОВАННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕМА МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ

Для обнаружения притопленных объектов на взлетно-посадочной полосе (ВПП) перед выполнением взлета или приводнения гидросамолета предложен способ [10] мониторинга, для которого разработано специальное донное приемоизлучающее антенное устройство (ПАУ) [11] гидроакустической аппаратуры (рис. 1). Необходимое количество ПАУ установлено на дне акватории летного бассейна (размеры ВПП: длина ~2500 м, ширина ~200 м, глубина от ~3 до 6 м), что в совокупности образует многопозиционную систему подводного наблюдения. Все ПАУ выполнены из m поршневых ЭАП одного типоразмера и конструкции, их акустические оси равномерно распределены в полупространстве и выходят из одной точки, являющейся геометрическим/фазовым центром как ПАУ, так и всех ЭАП.

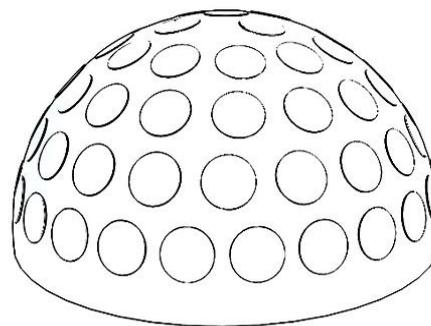


Рис. 1. Конструкция донного ПАУ [10]

Полусферическая апертура ПАУ (рис. 1) образована плоскостями апертур поршневых ЭАП, которые образуют на ней упорядоченные "параллели"/"меридианы". Пространственное размещение соседних ЭАП на полусфере позволяет разнести акустические оси на угол, обеспечивающий перекрывание на заданном уровне (например, 0.7) основных лепестков их ХН. Это позволяет формировать несколько естественных (некомпенсированных) результирующих ХН для кольцевых рядов ПАУ, у которых основные лепестки узки и "разночастотны" по углу места, но всенаправлены по азимуту, а неравномерность по давлению определяется выбранным значением уровней (0.9; 0.8; 0.7 и т.д.) перекрывания главных максимумов ХН соседних поршневых ЭАП. Применение ПАУ позволит осуществлять частотно окрашенный эхо-поиск, квантованный по m телесным секторам в полусфере за счет выбора оператором заданной схемы распределения рабочих циклов "излучение-прием" необходимых ЭАП и многоканального построения излучающих/приемных трактов гидроакустической аппаратуры. Использование многоканального коммутатора дает возможность пространственного перемещения направления эхо-поиска как в азимутальной, так и угломестной плоскостях (электронное сканирование за счет переключения ЭАП). Предложенный способ мониторинга [10] обеспечивает выполнение следующих задач:

- осмотр водного объема ВПП, причем для оперативного обнаружения объектов необходима многочастотная "УЗ-подсветка" из нескольких точек одновременно с помощью соседних ПАУ, образованных однотипными ЭАП в РПИ;
- активный/пассивный режим наблюдения на периметре летного бассейна, а также в шельфовой зоне, примыкающей к акватории;
- режимы удаленного измерения в различных точках акватории глубин, направлений и скорости

течения водных масс, амплитуд, скорости и направления бега ветровой волны [12, 13].

Отметим, что особенности конструкции донного ПАУ для случая использования в качестве излучающих элементов круглых плоских поршневых ЭАП описаны в [13], причем учтены нелинейные явления, возникающие в водной среде. Например, эффект самовоздействия возникает в результате нелинейного изменения упругих свойств водной среды в приосевой области пучка мощной волны накачки с частотой f и проявляется в генерации высших гармонических составляющих с кратными частотами $2f, 3f, \dots, nf$ при распространении к рассеивающей поверхности. Большого расширения рабочего диапазона частот УЗ-сигналов ПАУ можно достигнуть, если использовать нелинейное взаимодействие нескольких мощных волн накачки. Так, "традиционный" режим РПИ предполагает возбуждение каждого i -го ЭАП, где $i = (1 \div m)$, "индивидуальным" бигармоническим электрическим сигналом с частотами f_{1i}, f_{2i} , находящимися в его полосе пропускания. Тогда для каждого из m направлений эхо-поиска любой ЭАП в РПИ будет генерировать зондирующие полигармонические сигналы, включающие "оригинально окрашенные по частотам" наборы НЧ спектральных составляющих разностной $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}|$ и ВЧ суммарной и высших гармоник $f_{+i} = f_{2i} + f_{1i}, 2f_{2i}, 2f_{1i}, \dots, nf_{2i}, nf_{1i}$ ($n = 2, 3, \dots$), которые формируются в водной среде при распространении мощных сигналов накачки с частотами f_{1i}, f_{2i} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА УЧАСТКА КОЛЬЦЕВОГО РЯДА АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ

В условиях гидроакустического бассейна были проведены экспериментальные испытания макета участка кольцевого ряда ПАУ. Макет участка выполнен из "кусочно изогнутой" металлической полосы — основы (радиус кривизны 0.55 м) с элементом жесткости, который позволяет закрепить конструкцию на штанге поворотного-выдвижного устройства гидроакустического бассейна. По длине полосы-основания распределены пять одинаковых площадок для размещения однотипных поршневых ЭАП 1–5 с плоской апертурой диаметром 65 мм. Площадки в вертикальной плоскости смещены друг относительно друга, так что угол разнесения акустических осей ЭАП 1–5 в горизонтальной плоскости составляет $\alpha = 6^\circ$. Конструкция макета позволяет переключением ЭАП 1–5 проводить на спектральных составляющих f_{1i}, f_{2i} ,

$F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}|$ и $f_{+i} = f_{2i} + f_{1i}, 2f_{2i}, 2f_{1i}, \dots, nf_{2i}, nf_{1i}$ ($n = 2, 3, \dots$) дискретное сканирование соответствующих ХН ПИА с шагом 6° в секторе 30° . Полоса пропускания ЭАП 1–5 составляет 10% от их резонансной частоты $f_0 = 250$ кГц, т.е. $\Delta f = 25$ кГц, тогда в пределах частотного диапазона $\{(f_0 - \Delta f/2) = 237.5$ кГц $\div (f_0 + \Delta f/2) = 262.5$ кГц $\}$ были сформированы с шагом 2 кГц значения сигналов накачки: $f_{1(1)} = 238$ кГц, $f_{1(2)} = 240$ кГц, $f_{1(3)} = 242$ кГц, $f_{1(4)} = 244$ кГц, $f_{1(5)} = 246$ кГц.

Синхронное "разночастотное" возбуждение нескольких ЭАП 1–5 макета позволяет формировать за счет эффектов самовоздействия и взаимодействия необходимые секторные ХН в азимутальной плоскости (рис. 2 и 3). На рис. 2 в декартовой системе координат "амплитуда – направление эхо-поиска" представлены нормированные распределения уровней амплитуд звукового давления на сигналах накачки $f_{1(1-5)}$ (сплошная линия) и их двух высших гармониках $2f_{1(1-5)} = 476, 480, 484,$

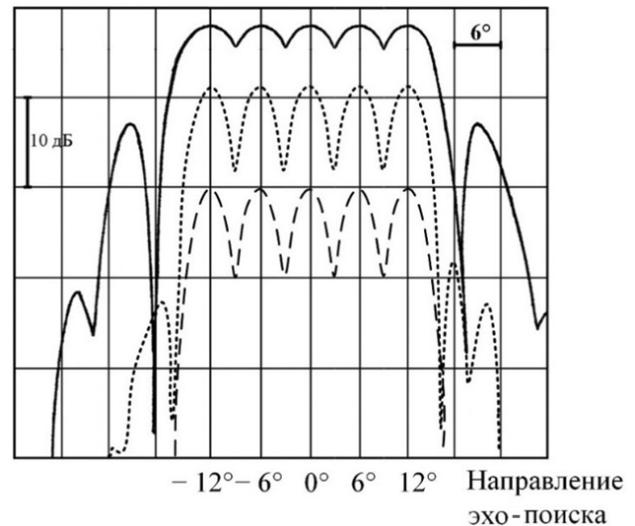


Рис. 2. Результирующие основные лепестки секторных ХН макета участка кольцевого ряда ПАУ в азимутальной плоскости.

— для сигналов накачки $f_{1(1-5)} = 238, 240, 242, 244, 246$ кГц;
 для их 2-х гармоник $2f_{1(1-5)} = 476, 480, 484, 488, 492$ кГц;
 - - - - - для их 3-х гармоник $3f_{1(1-5)} = 714, 720, 726, 732, 738$ кГц

488, 492 кГц (пунктирная линия) и $3f_{1(1-5)} = 714, 720, 726, 732, 738$ кГц (штриховая линия) соответственно.

Соотношения уровней нормированных распределений соответствуют условиям проведения эксперимента, в частности размещению измерительного гидрофона на расстоянии 4 м от ЭАП 1–5 макета. В эксперименте было задано последовательное увеличение частот зондирующих сигналов накачки: $f_{1(1)} = 238$ кГц, $f_{1(2)} = 240$ кГц, $f_{1(3)} = 242$ кГц, $f_{1(4)} = 244$ кГц, $f_{1(5)} = 246$ кГц при изменении направления эхо-поиска слева направо, т.е. парциальные основные лепестки в секторных ХН "разночастотны", причем это же касается и двух высших гармоник $2f_{1(1-5)}$ и $3f_{1(1-5)}$. Так, если принять за начало координат (0°) в секторной ХН макета участка кольцевого ряда ПАУ центральный ЭАП 3, видно, что, например, для крайних левого (-12°) и правого ($+12^\circ$) направлений эхо-поиска в водной среде можно синхронно сформировать импульсное облучение с различной "частотной окраской": $f_{1(1)} = 238$ кГц, $2f_{1(1)} = 476$ кГц, $3f_{1(1)} = 714$ кГц и $f_{1(5)} = 246$ кГц, $2f_{1(5)} = 492$ кГц, $3f_{1(5)} = 738$ кГц. Как следует из рис. 2, парциальные основные лепестки для сигналов кратных частот соосны, но имеют отличающиеся как угловую ширину максимумов для одинаковых уровней амплитуд, например (-3 дБ): $\theta_{0.7(f_1)} = 5.8^\circ$; $\theta_{0.7(2f_1)} = 3.8^\circ$; $\theta_{0.7(3f_1)} = 2.6^\circ$, — так и уровень бокового поля: $P_{\text{бн}(f_1)} = -11$ дБ, $P_{\text{бн}(2f_1)} = -20$ дБ, $P_{\text{бн}(3f_1)} = -43$ дБ.

Из рис. 2 видно, что в азимутальной плоскости флуктуации уровней парциальных основных лепестков в области результирующего максимума секторных ХН для сигналов $f, 2f, 3f$ составляли не более 3, 7, 9 дБ соответственно, что вызвано выбором величины угла разнесения (6°) акустических осей ЭАП макета участка кольцевого ряда ПАУ. Угловая ширина по уровню -3 дБ результирующих основных лепестков секторных ХН в азимутальной/угломестной плоскости для сигналов $f, 2f, 3f$ составляет $\approx 30^\circ / 6^\circ$; $28^\circ / 3.8^\circ$; $27.7^\circ / 2.6^\circ$ соответственно, причем очевидно, что возможна реализация как разно-, так и моночастотных результирующих основных лепестков более сложной формы.

На рис. 3 в декартовой системе координат "амплитуда – направление эхо-поиска" представлено нормированное распределение уровня амплитуды звукового давления на сигнале разностной частоты (СРЧ) $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}| = 25$ кГц, которое анало-

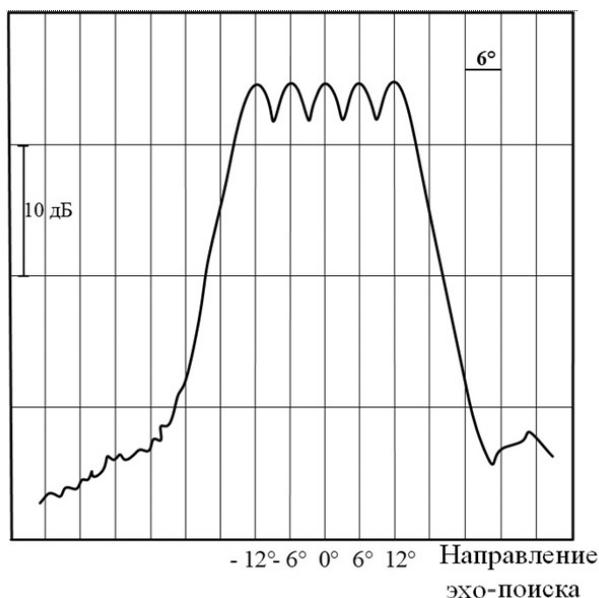


Рис. 3. Результирующий основной лепесток секторной ХН в азимутальной плоскости для СРЧ $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}| = 25$ кГц

гично рассмотренным выше. Угловая ширина по уровню -3 дБ результирующего основного лепестка секторной ХН в азимутальной/угломестной плоскости для СРЧ также составляет $\approx 30^\circ / 6^\circ$, причем в данном случае боковое излучение практически отсутствует.

До настоящего времени ПИА использовали в системах дальнего эхо-поиска как компактный источник только НЧ-сигнала, обладающего малыми значениями как уровня бокового излучения, так и угловой ширины основного лепестка, величина которого $\theta_{0.7(F)}$ по уровню 0.7 определяется шириной основного лепестка ЭАП на частотах f_1, f_2 . Известны и недостатки данного режима излучения зондирующего сигнала разностной частоты (СРЧ) — малый КПД, слабонаправленный прием эхо-сигналов, значительный уровень акустических шумов в рабочем диапазоне, которые отсутствуют для формирующихся высокочастотных $f_+ = f_2 + f_1, 2f_2, 2f_1$ спектральных составляющих, использование которых может обеспечить получение дополнительной информации на мелководной акватории.

ОЦЕНКА УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (РПИ)

Проведем сопоставительный расчет для типового ЭАП в режиме РПИ на формирующихся

в водной среде НЧ и ВЧ компонентах — сигналах разностной (СРЧ) и суммарной (ССЧ) частот, а также оценим энергетические характеристики систем активной локации, в которых используются данные сигналы.

Звуковое давление $P_+(r)$ для ССЧ на оси ПИА может быть определено из формулы:

$$P_+(r) = \frac{\varepsilon \omega_+ P_{01} P_{02} L_d}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0.25 \ln^2(1+z_n^2) + \operatorname{arctg}^2 z_n}{1+z_n^2}} e^{-\beta_+ r}, \quad (1)$$

где $\omega_+ = 2\pi f_+ = 2\pi(f_1 + f_2) = 4\pi f_0$, [Гц] — циклическая частота ССЧ; P_{01}, P_{02} — амплитуды звукового давления сигналов бигармонической накачки у поверхности ЭАП, [Па]; ρ_0, c_0 — значения равновесных плотности и скорости распространения звука в воде соответственно; $L_d = a^2 \omega_0 / 2c_0$ — расстояние дифракции на центральной частоте накачки $f_0 = c_0 / \lambda_0 = (f_1 + f_2) / 2$, [м]; $\varepsilon = 3.5$ — нелинейный параметр воды; a — радиус апертуры ЭАП, [м]; $z_n = r / L_d$ — нормированное расстояние r ; β_+ — коэффициент затухания ССЧ, [Нп/м]. Отметим, что нелинейные эффекты самовоздействия и взаимодействия возникают при распространении в водной среде интенсивных УЗ-волн накачки с частотами f_1, f_2 . Это задает интервал значений волновых размеров D / λ от 10 до $15.1 \times 10^3 / \sqrt{P_0}$ для обратимого ЭАП параметрической излучающей антенны (ПИА).

На расстояниях $r > 2L_d$ звуковое давление $P_-(r)$ для СРЧ описывается выражением [14]:

$$P_-(r) = \frac{\varepsilon \Omega P_{01} P_{02} L_d}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{\ln^2\left(\frac{L_d}{l_d} z_n\right) + \frac{\pi^2}{4}}{1 + (L_d / l_d)^2 z_n^2}} e^{-\beta_- r}, \quad (2)$$

где $\Omega = 2\pi F_- = 2\pi(f_1 - f_2)$, [Гц] — циклическая частота СРЧ; $L_d = a^2 \Omega / 4c_0$ — расстояние дифракции для СРЧ, [м]; β_- — коэффициент затухания для СРЧ.

На рис. 4 представлены расчетные графики зависимостей распределений амплитуд звукового давления P_+, P_- для сигналов суммарной ($f_+ = 550$ кГц) и разностной ($F_- = 50$ кГц) частот, генерируемых на акустической оси одним из ЭАП ПАУ. Как видно из рис. 4, данные сигналы имеют одинаковую амплитуду на расстоянии ≈ 340 м,

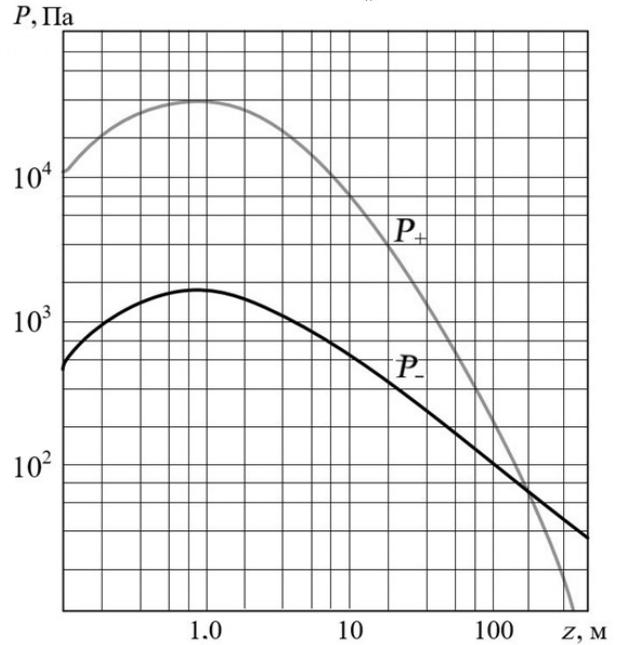


Рис. 4. Графики зависимостей распределений амплитуд звукового давления P_+, P_- на сигналах суммарной f_+ и разностной F_- частот для акустической оси ЭАП

а на меньших дистанциях уровень ССЧ частоты выше амплитуды СРЧ, например, на дистанциях 10 и 100 метров — на 26 дБ и 18 дБ соответственно.

Проведем сравнение энергетических характеристик для этого ЭАП, используемого в РПИ на СРЧ и ССЧ, которые могут быть использованы в качестве рабочих локационных сигналов. Известно, что энергетическая дальность действия гидроакустической аппаратуры определяется из уравнения гидролокации [15]

$$P_c = \delta P_n, \quad (3)$$

где P_c — звуковое давление эхо-сигнала в точке приема, [Па]; P_n — звуковое давление помехи, [Па]; $\delta = \sqrt{2} K_\delta / \sqrt{\Delta F T}$ — коэффициент распознавания, в котором K_δ — коэффициент надежности приема, т.е. минимально допустимое отношение напряжения сигнала к напряжению помехи на входе индикатора; ΔF — полоса пропускания приемного тракта, [Гц]; T — время усреднения сигнала, принимаемое на практике равным длительности зондирующего импульса τ , [с].

Акустические шумы водоемов на частотах свыше 100–200 кГц определяются тепловым шумом, связанным с движением молекул воды.

Интенсивность теплового шума в определенной полосе частот, воспринимаемая направленным обратимым ЭАП, определяется из выражения

$$I_{ш} = I' \frac{\Delta f}{\gamma} = I' \frac{1.15 \Delta F}{\gamma}, \text{ где } I' \approx a_1 f^2 \text{ — интенсивность плоских акустических волн, приходящихся на единицу полосы частот и вызывающих эффект, эквивалентный тепловому возбуждению ненаправленного гидрофона окружающей средой; } a_1 = 16\pi k_\delta T_A / c^2, T_A = 273.18 + T, \text{ где } T_A \text{ — абсолютная температура, [K]; } k_\delta, \text{ [Дж/К] — постоянная Больцмана; } \Delta f, \Delta F \text{ — шумовая полоса и полоса пропускания приемного тракта соответственно, [Гц]; } \gamma \text{ — коэффициент осевой концентрации обратимого ЭАП.}$$

Тогда для РПИ на ССЧ при коротких длительностях зондирующего сигнала давление шумовой помехи P_n можно определить из выражения $P_n = P'(\Delta f / \gamma)^{1/2}$, где $P' = (I' \rho_0 c_0)^{1/2}$, [Па]. Левая часть уравнения (3), представляющая собой звуковое давление эхо-сигнала на ССЧ в точке приема, определяется с учетом особенностей рассматриваемого РПИ, т.к. распределение звукового давления ССЧ по направлению к цели и обратно описывается разными зависимостями. В соответствии с этим уровень звукового давления эхо-сигнала на ССЧ в точке приема определяется из выражения

$$P_c = \frac{P_+(r)R_3}{2r} e^{-\beta_s r},$$

где $P_+(r)$ — уровень звукового давления ССЧ в точке r в осевом направлении, [Па]; r — расстояние до цели, [м]; R_3 — эффективный радиус цели, гидролокационного объекта (ГЛО), условно заменяемого эквивалентной отражающей УЗ сферой, [м].

После подстановки в (3) рассмотренных выше выражений для δ , P_n и P_c для уравнения гидролокации имеем:

$$\frac{P_+(r)R_3}{2r} e^{-\beta_s r} = \frac{\sqrt{2k_\delta}}{\sqrt{\tau \Delta F}} \frac{P' \sqrt{1.15 \Delta F}}{\sqrt{\gamma}}. \quad (4)$$

Уравнение гидролокации, представленное в виде (4), позволяет провести анализ энергетических характеристик систем активной локации, в которых используются в качестве зондирующих ССЧ и СРЧ. С этой целью необходимо рассчитать максимальные дистанции обнаружения r для объектов с заданными эффективными радиусами R_3 при имеющихся уровнях звуковых давлений: помехи

в точке приема $P_{n\pm}$, рабочих сигналов суммарной и разностной частот $P_\pm(r)$ в точке r . Указанный расчет проведем для локатора с типовым ЭАП в РПИ при следующих характеристиках.

СРЧ: $F_- = 50$ кГц, частоты накачки $f_1 = 250$ кГц, $f_2 = 300$ кГц; угловая ширина основного лепестка ХН ЭАП — в режиме излучения 6° , в режиме приема 40° (диаметр ЭАП равен $2a = 65$ мм); длительность импульса посылки $\tau = 1$ мс; уровень приведенных помех $P_{n0} = 0.1$ Па и коэффициент надежности $K_\delta = 2$; амплитуда звукового давления сигналов накачки у поверхности антенны $P_0 = P_{01}, P_{02} = 2.52 \times 10^5$ Па.

ССЧ: $f_+ = 550$ кГц; угловая ширина основного лепестка ХН — в режиме излучения 3.5° , в режиме приема 2.5° (диаметр ЭАП $2a = 65$ мм); уровень давления теплового шума $P' = 2 \times 10^4$ Па в полосе пропускания приемного тракта $\Delta F = 1$ кГц.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости с пересчетом эффективного радиуса R_3 в силу цели $T_s = 20 \lg(R_3/2)$ для локатора с типовым ЭАП из ПАУ, где знаком (+) отмечена кривая для РПИ

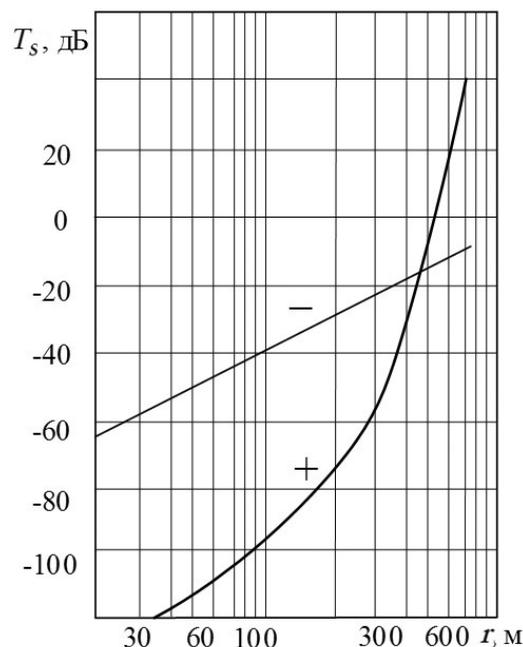


Рис. 5. Расчетные зависимости максимальных дистанций обнаружения r для объектов с заданными величинами силы цели T_s для локатора с ЭАП в РПИ на ССЧ $f_+ = 550$ кГц и на СРЧ $F_- = 50$ кГц

на ССЧ $f_+ = 550$ кГц, а знаком (–) прямая для РПИ на СРЧ $F_- = 50$ кГц. Каждая зависимость делит поле рис. 5 на две области — верхнюю (в которой локатор с ЭАП в РПИ эффективен для обнаружения) и нижнюю (в которой локатор с ЭАП в РПИ не эффективен).

ВЫВОДЫ

Из анализа представленных кривых следует, что РПИ на ССЧ целесообразнее использовать (чем на СРЧ) при обнаружении объектов с силой цели T_s до –18 дБ на дистанциях до 460 м. В [16, табл. 1.3] представлены результаты экспериментальных измерений эффективной площади рассеяния одиночных объектов, в частности расчетные величины эффективного радиуса R_e и силы цели T_s , обнаружение которых в охранной зоне акватории является актуальным. Например, сила цели T_s для бревна, вертикально стоящего в воде, диаметром 15 см и длиной 150 см составляет около –34 дБ, для шеста деревянного вертикального — (–42 дБ), для пловца в вертикальном положении — (–22 дБ), для полой резиновой сферы диаметром 12 см с толщиной стенки 2 мм — (–38 дБ). Отметим, что все данные объекты имеют величину силы цели меньше, чем (–18 дБ), что подтверждает справедливость первого вывода. Так, для пловца с (–22 дБ) проводим горизонтальную линию от значения (–22 дБ) вертикальной оси T_s до пересечения с расчетными зависимостями (+) и (–), затем проецируем точки пересечений на горизонтальную ось r дальности и получаем около 420 м и 300 м соответственно. Выигрыш в энергетической дальности обнаружения на ССЧ (на дистанциях, меньших 460 м) обусловлен повышением направленности по излучению/приему, снижением уровня акустических сигналов в полосе пропускания приемного тракта, а также эффективностью генерации зондирующих ССЧ.

Как отмечено в [4], для зональной гидроакустической станции (ЗГАС) при глубине охраняемой акватории от 2 до 60 м, приведенном уровне шумовых помех на частоте 1 кГц в полосе 1 Гц до 0.04 Па и уровне излучения сигналов не менее 160 дБ:

– максимальная дальность обнаружения нарушителя должна быть выбрана из ряда 100, 200, 300, 400, 500 м и далее с шагом 100 м;

– сектор обзора охраняемой зоны акватории в азимутальной плоскости для одной ЗГАС должен быть не менее 60° и выбран из ряда: 60°, 90°, 180°, 270°, 360°;

– сектор обзора ЗГАС в угломестной плоскости должен быть от 2° до 30°;

– количество одновременно сопровождаемых гидроакустических целей одной ЗГАС должно быть не менее 2.

Как следует из представленных выше материалов, применение антенных устройств с использованием эффектов нелинейной акустики для квантованного обследования водного объема с регулируемой угловой разрешающей способностью и "частотной окраской" заданных направлений эхо-поиска в азимутальной/угломестной плоскости может быть перспективным для повышения эффективности гидроакустических средств на прибрежной мелководной акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схема организации охраны городка VIP-персон со стороны акватории. [Электронный ресурс]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/10.htm (дата обращения 27.11.2023 г.).
2. Схема организации охраны нефтеналивного танкера со стороны акватории. [Электронный ресурс]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/7.htm (дата обращения 27.11.2023 г.).
3. Схема организации охраны моста стратегического назначения со стороны акватории. [Электронный ресурс]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/6.htm (дата обращения 27.11.2023 г.).
4. ГОСТ Р 57557-2017 Средства и системы охранные гидроакустические. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 27.07.2017; Федеральное агентство по техническому, регулированию и метрологии. Москва: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2017. 23 с.
5. Соловьев В.Г., Афруткин Г.И., Стрелков И.М. и др. Способ обнаружения подводных объектов на морском рубеже в мелком море. Патент РФ N 2161319. 21.12.2000.
6. Кадыков И.Ф. Метод и система обнаружения целей при гидролокации. Патент РФ N 2383899. 10.03.10.
7. Сидоров В.В. Система параметрической гидролокации с функцией получения акустического изображения целей. Патент РФ N 2488845. 27.07.12.
8. Platform carried bistatic sonar. Patent USA N US005237541A. GTE Government Systems Corporation. 17.08.93.
9. Bistatic/monostatic sonar fence. Patent USA N US5305286A. Sonetech Corporation. 19.04.94.
10. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., Ли В.Г. Способ подготовки летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета. Патент РФ N 2464205. 20.10.2012.

11. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство. Патент РФ N 104732. 20.05.2011.
12. Тарасов С.П., Волощенко Е.В. и др. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения. Патент РФ N 2721307. 18.05.2020.
13. Волощенко Е.В., Тарасов С.П. Измерение характеристик морского волнения на основе применения эффектов нелинейной акустики // Акустика среды обитания (АСО-2021): материалы Шестой Всероссийской конф. молодых ученых и спец. М.: МГТУ им. Баумана, 2021. С. 70–75.
14. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
15. Тюрин А.М., Сташкевич А.П., Таранов Э.С. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1968. 296 с.
16. Яковлев А.Н., Каблов Г.П. Гидролокаторы ближнего действия. Л.: Судостроение, 1983. 200 с.

Южный федеральный университет, Таганрог

Контакты: Волощенко Елизавета Вадимовна,
voloshchenko.liza@mail.ru

Материал поступил в редакцию 06.12.2023

THE NONLINEAR ACOUSTICS APPLICATION FOR INCREASING SONAR'S EFFICIENCY ON SHELF

E. V. Voloshchenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

It is proposed to ensure the safety of seaboard structures by conducting the water volume's multi-position monitoring of the coastal protective zone using hydroacoustic means with antennas that employ the effects of nonlinear acoustics, in particular, self-action and interaction of ultrasonic pump waves. An analysis has been made of the use of hydroacoustic active location systems with receiver-emitting antenna devices of an original design, which are placed on the bottom of a shallow water area and used to detect surface and underwater objects, as well as remotely obtain information about hydro conditions at various points in the shelf's water area. Calculated results of assessing the energy range of an active location hydroacoustic system in the parametric radiation mode and an analysis of the spatial characteristics of the considered antenna device's model are presented, which confirm the possibility of obtaining the claimed result.

Keywords: ultrasonic monitoring of shallow water volume, coastal protective zone, parametric transmitting array

REFERENCES

1. *Skhema organizatsii okhrany gorodka VIP-person so storony akvatorii* [Scheme of organization of security of VIP-persons' camp from the water area side]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/10.htm (accessed 27.11. 2023 г.). (In Russ.).
2. *Skhema organizatsii okhrany neftenalivnogo tankera so storony akvatorii* [Scheme of organization of oil tanker security from the water area side]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/7.htm (accessed 27.11. 2023 г.). (In Russ.).
3. *Skhema organizatsii okhrany mosta strategicheskogo naznacheniya so storony akvatorii* [Scheme of strategic bridge security organization from the water area side]. URL: http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks/old/analmat/1_2002/tepr/6.htm (accessed 27.11.2023 г.). (In Russ.).
4. *GOST R 57557-2017 Sredstva i sistemy okhrannye gidroakusticheskie* [Hydroacoustic security equipment and systems]. Moscow, FGUP "STANDARTINFORM", 2017. 23 p. (In Russ.).
5. Solov'ev V.G., Afrutkin G.I., Strelkov I.M., et al. *Sposob obnaruzheniya podvodnykh ob"ektov na morskoy rubezhe v melkom more. Patent RF RU2161319C1* [Method of

- detecting underwater objects on the offshore boundary in a shallow sea]. *Prioritet* 21.12.2000. (In Russ.).
6. Kadykov I.F. *Metod i sistema obnaruzheniya tselei pri gidrolokatsii*. Patent RF no. RU2383899C1 [Method and system of target detection in sonar]. *Prioritet* 10.03.10. (In Russ.).
 7. Sidorov V.V. *Sistema parametricheskoi gidrolokatsii s funktsiei polucheniya akusticheskogo izobrazheniya tselei*. Patent RF no. RU2488845C1 [Parametric sonar system with acoustic target imaging function]. *Prioritet* 27.07.12. (In Russ.).
 8. *Platform carried bistatic sonar*. Patent USA no. US005237541A. GTE Government Systems Corporation. 17.08.93.
 9. *Bistatic/monostatic sonar fence*. Patent USA no. US5305286A. Sonetech Corporation. 19.04.94.
 10. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P., Li V.G. *Sposob podgotovki letnogo basseina gidroaerodroma dlya vypolneniya vzleta i privodneniya gidrosamoleta*. Patent RF no. RU2464205C1 [Method of preparation of a seaplane flight basin for seaplane takeoff and landing]. *Prioritet* 20.10.2012. (In Russ.).
 11. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P. *Mnogochastotnoe gidroakusticheskoe priemoizluchayu-shchee antennoe ustroystvo*. Patent RF no. RU104732C1 [Multi-frequency hydroacoustic receiving and emitting antenna device]. *Prioritet* 20.05.2011. (In Russ.).
 12. Tarasov S.P., Voloshchenko E.V., et al. *Akusticheskii sposob i ustroystvo izmereniya parametrov morskogo volneniya*. Patent RF no. RU2721307C1 [Acoustic method and device for measuring sea swell parameters]. *Prioritet* 18.05.2020. (In Russ.).
 13. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. [Measurement of sea wave characteristics based on the application of nonlinear acoustic effects]. *Materialy VI Vserossiiskoi konf. molodykh uchenykh i spets. "Akustika srede obitaniya (ASO-2021)"* [Proc. 6th All-Russ. Conf. young scientists and specialist "Habitat Acoustics (ASO-2021)"]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, 2021. P. 70–75. (In Russ.).
 14. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. *Nelineinaya gidroakustika* [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).
 15. Tyurin A.M., Stashkevich A.P., Taranov Eh.S. *Osnovy gidroakustiki* [Fundamentals of hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1968. 296 p. (In Russ.).
 16. Yakovlev A.N., Kablov G.P. *Gidrolokatory blizhnego deistviya* [Short-range sonars]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 200 p. (In Russ.).

Contacts: *Voloshchenko Elizaveta Vadimovna*,
voloshchenko.liza@mail.ru

Article received by the editorial office on 06.12.2023

INTRODUCTION

Currently, the organization of protection of various objects, for example, strategic bridges, from the water area, includes the use of hydro-acoustic means of detecting underwater/surface objects [1–3]. General technical requirements and test methods for security hydroacoustic systems for the protection of marine (river) and coastal basing from the adjacent water area are described in [4].

Let us consider the available messages on the discussed problem. There is a known method for detecting underwater objects [5] in shallow seas, which includes placing a barrier line with known coordinates on the bottom surface. A barrier line is a sea boundary of N receiving-emitting interference antennas with their own resonant frequency f_N that provides both monostatic and bi-static echo search schemes in the volume of the irradiated spatial band. Reliability and continuity of control of the irradiated water strip without areas of uncertain reception are ensured by the use of both "different-frequency coloring" of adjacent areas of the band, as well as monostatic/bistatic reception of ultrasonic (US) echo signals in various frequencies using groups of three adjacent interference antennas. The disadvantages of the method include the lack of a passive mode of noise-finding, non-directional mode of both radiation and reception by interference antennas when detecting a strip of protected water area. In this case, the operating mode ("emission-reception" – the examined "quantum" of the water half-space) determines both the absence of angular resolution elements in both planes and the ineffectiveness of using ultrasonic energy during emission. Another problem is the zones of uncertain detection of objects near the interface boundaries, and the task of prompt detecting and determining the location of several underwater targets simultaneously in a volume of water has not been implemented.

The method of detecting and determining the location of underwater intruders in coastal marine areas, river beds, canals, and lakes when protecting underwater structures, for example, bridge supports, anchored ships, platforms, etc., is considered in [6]. A feature of the method is the formation of a control zone 100–200 m wide in a shallow water area at the entrance to a port or bay through the use of an underwater spatially distributed interference antenna. In this case, the antenna device must provide sectoral irradiation (one emitter) and non-directional reception of echo signals to determine the coordinates of the direction-finding object (three receivers) in the azimuthal plane of the water volume. To reduce the levels of reverberation interference from the water surface and bottom, it is assumed that the antenna device will provide ultrasonic radiation/reception with the directional characteristic (DC) of a narrow main lobe in the ele-

vation plane. This is achieved due to the large vertical size of the emitter/receiver apertures but it does not solve the problem of the presence of zones of uncertain detection of objects near the interfaces. It is proposed to expand the monitoring zone by increasing the number of both receivers and emitters, which will be accompanied by interference from mutual influence and will require different "frequency colors" of the probing signals, i.e., setups must differ from each other in the design of emitters/receivers. In [6], the problem of operational detection and determination of the location of several underwater targets simultaneously in a body of water is also not discussed.

Note that the tactical advantage of horizontal sonar systems is a wide viewing area, which allows one to obtain more information about the underwater situation. However, as follows from what was discussed above, reverberation interference occurs due to the emission/reception of ultrasonic energy in the directions of the side lobes of the antenna DC. The disadvantage of antennas, which functioning and spatial selectivity are determined by the phenomenon of interference, is the limited resonant passband, i.e., the small range of working ultrasonic probing signals.

SONAR SYSTEMS WITH A MODE OF PARAMETRIC RADIATION (PRM) OF LOW FREQUENCY SPECTRAL COMPONENTS

One of the promising directions of designing antennas of sonar systems to expand the range of operating signals while reducing both the lateral radiation field with a fairly narrow main lobe and mass-dimensional values is taking into account the nonlinearity of the elastic properties of water. In this case, additional LF and HF spectral components are generated in the aquatic environment during the propagation of a powerful probing signal emitted by an antenna device, for example, a difference frequency signal (DFS) $F_- = |f_1 - f_2|$ in the case of a dual-frequency pump signal f_1, f_2 . The mode of parametric radiation (PRM) of probing signals of difference (DFS) $F_- = |f_1 - f_2|$ or sum (SFS) $f_+ = f_2 + f_1$ frequencies, or higher harmonics nf_1, nf_2 , allows the use of small-sized resonant electro-acoustic converters (EACs) for the implementation of antennas, the passband of which includes frequencies $f_{1,2}$ ($f_{1,2} \gg F_-$) of pump waves.

Let's discuss the available messages. A sonar system for detecting, determining the location and parameters of target movement in a given sector (approach channels of bays, ports, water areas of hydro and nuclear power plants) with underwater sound vision is proposed in [7]. It is assumed that the antenna device in which the parametric radiation mode (RP) is im-

plemented will ensure the combination of long-range detection of an object (DFS $F_- = |f_1 - f_2| = 50$ kHz) with subsequent short-range identification due to obtaining an ultrasonic image (pump signals $f_1, f_2 = 400$ and 450 kHz) during longitudinal probing of a water volume.

According to the author, the location system, which has an antenna device made of three elements — one emitting pump signals and two receiving signals for echo signals at LF and HF — can be used to protect coastal objects or surface ships in shallow waters, i.e., in the presence of different interfaces in the hydroacoustic locating channel. However, their masking influence is not taken into account, for example, in the antenna design: the antenna aperture must be an order of magnitude larger than for receiving pump signals to ensure directional reception of reflected DFS.

To detect targets moving slowly in a horizontally extended volume of water on the shelf, a small-sized, lowered from a helicopter receiving-radiating antenna set was proposed for a mobile hydroacoustic system with monostatic/bistatic step echo search in both azimuthal and elevation planes. PRM is used to generate low-frequency probing pulses [8]. As receiving elements, vertically or horizontally located linear receiving antennas are used, for example, localized in the radiation region (monostatic scheme) or remote (bistatic scheme), on nearby radio sonobuoys. The disadvantage of this hydroacoustic system is the high level of masking noise interference caused by the use of a mobile carrier — a helicopter. With a monostatic echo search scheme, difficulties with the design of the receiving antenna at LF are not resolved.

A hydroacoustic active locating system for monostatic/bistatic ultrasonic echo search in the water half-space above them, containing at least two bottom receiving-emitting antenna devices (RAD), was proposed in [9]. The radiating and receiving elements of each antenna device are distributed vertically from top to bottom along its post, normally installed relative to the bottom. The device includes:

1) high-frequency (HF) oriented up emitter, the location of the acoustic axis of which can be changed stepwise in two planes by the operator, which allows irradiating the water volume both from below and from above during echo search due to reflection from the water-air interface;

2) a parametric emitting antenna (PEA), the use of which provides a pulsed mode of irradiation of the aquatic environment with the DFS in the range of 2–6 kHz, due to "step" scanning with the main lobe with an angular width of 6° in the azimuthal plane;

3) a vertically located linear receiving antenna, the EAC switching of which allows one to directionally receive echo signals when choosing the maximum signal-to-noise ratio.

Unfortunately, in [9] there is no information about the cumbersome design of the bottom RAD, which makes it possible to implement the proposed method. PEA is used only in the mode of generating probing DFS, while the more efficiently generated HF-components — the sum frequency signal (SFS) $f_+ = (f_1 + f_2)$ and higher harmonics nf_1, nf_2 of pump signals — are not used for near location.

ANTENNA DEVICE FOR QUANTIZED SURVEY OF WATER VOLUME OF SHALLOW WATERS

To detect submerged objects on the runway, before taking off or splashing down a seaplane, a monitoring method [10] has been proposed, for which a special bottom receiving antenna device (RAD) [11] has been developed (Fig. 1). The required amount of PAD was installed at the bottom of the flight water area (runway dimensions: length ~ 2500 m, width ~ 200 m, depth from ~ 3 to 6 m), which together forms a multi-position underwater surveillance system. All PAD are made of m piston EACs of the same standard size and design, their acoustic axes are evenly distributed in the half-space and emerge from one point, which is the geometric/phase center of both the RAD and all EAC.

Fig. 1. Design of bottom RAD

The hemispherical aperture of the RAD (Fig. 1) is formed by the planes of the apertures of the piston EAC, which form ordered "parallels"/"meridians" on it. The placement of neighboring EAC on a hemisphere allows the acoustic axes to be spaced apart at an angle that ensures overlap at a given level (for example, 0.7) of the main lobes of their DC. This allows the formation of several natural (uncompensated) resulting CNs for the RAD ring rows, in which the main lobes are narrow and "different-frequency" in elevation angle, but omnidirectional in azimuth. The unevenness in pressure is determined by the selected value of the levels (0.9; 0.8; 0.7, etc.) of overlap of the main maxima of the DCs of neighboring piston EACs. The use of RAD allows for frequency-colored echo search, quantized by m solid sectors in the hemisphere, due to the operator's choice of a given scheme for distributing the "emitting-receiving" operating cycles of the necessary EACs and the multi-channel construction of emitting/receiving paths of hydroacoustic equipment. The use of a multi-channel switch makes it possible to spatially move the echo search direction in both the azimuth and elevation planes (electronic scanning due to EAC switching).

The proposed monitoring method [10] ensures the following tasks:

- inspection of the water volume of the runway. The rapid detection of objects is enabled by multi-frequency "ultrasonic illumination" from several points simultaneously by means of the neighboring RAD formed by the same type EAC in the PRM;
- active/passive surveillance mode on the perimeter of the flight basin, as well as in the shelf zone adjacent to the water area;
- modes of remote measurement of depths, directions, and speed of flow of water masses, amplitudes, speed, and direction of running of wind waves at various points of the water area [12, 13].

Note that the design features of the bottom PAD for using round flat piston EAC as radiating elements are described in [13], and nonlinear phenomena that arise in the aquatic environment are taken into account. For example, the self-action effect arises as a result of a nonlinear change in the elastic properties of the aqueous medium in the paraxial region of the beam of a powerful pump wave with frequency f and manifests itself in the generation of higher harmonic components with multiple frequencies $2f, 3f, \dots, nf$ during propagation to the scattering surface. A greater expansion of the operating frequency range of PAH ultrasonic signals can be achieved by using the nonlinear interaction of several powerful pump waves. Thus, the "traditional" PRM involves the excitation of each i -th EAC, where $i = (1 \div m)$, by an "individual" biharmonic electrical signal with frequencies f_{1i}, f_{2i} , located in its passband. Then, for each of the m echo search directions, any EAC in the PRM will generate probing poly-harmonic signals, including "originally frequency-colored" sets of LF spectral components of the difference $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}|$ and HF total and higher harmonics $f_{+i} = f_{2i} + f_{1i}, 2f_{2i}, 2f_{1i}, \dots, nf_{2i}, nf_{1i} (n = 2, 3, \dots)$, which are formed in the aquatic environment during the propagation of powerful pump signals with frequencies f_{1i}, f_{2i} .

EXPERIMENTAL TESTS OF MODEL OF THE RING ROW SECTION OF ANTENNA DEVICES

Experimental tests of the model site of a ring row of RAD were carried out under the conditions of a hydroacoustic pool. The model of the site is made of a "piecewise curved" metal strip — the base (radius of curvature 0.55 m) with a rigidity element that allows you to fix the structure on the rod of the rotary-retractable device of the hydroacoustic pool. Five identical areas are spaced along the length of the base strip to accommodate the same type of piston EAC 1–

5 with a flat aperture of 65 mm in diameter. The areas in the vertical plane are shifted relative to each other, so that the separation angle of the acoustic axes of EAC 1–5 in the horizontal plane is $\alpha = 6^\circ$. The design allows discrete to carry out scanning of the corresponding PEA DC with a step of 6° in a sector of 30° on spectral components $f_{1i}, f_{2i}, F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}|$ и $f_{+i} = f_{2i} + f_{1i}, 2f_{2i}, 2f_{1i}, \dots, nf_{2i}, nf_{1i} (n = 2, 3, \dots)$ by switching EAC 1–5. The passband of EAC 1–5 is 10% of their resonant frequency $f_0 = 250$ kHz, i.e. $\Delta f = 25$ kHz, then within the frequency range $\{(f_0 - \Delta f / 2) = 237.5 \text{ kHz} \div (f_0 + \Delta f / 2) = 262.5 \text{ kHz}\}$ the pump signal values were generated with a step of 2 kHz: $f_{1(1)} = 238$ kHz, $f_{1(2)} = 240$ kHz, $f_{1(3)} = 242$ kHz, $f_{1(4)} = 244$ kHz, $f_{1(5)} = 246$ kHz.

Synchronous «multi-frequency» excitation of several EAPs 1–5 of the model makes it possible to form, due to the effects of self-action and interaction, the necessary sectoral DC in the azimuthal plane (Figs. 2 and 3). In Fig. 2 in the Cartesian coordinate system "amplitude – direction of echo search", normalized distributions of sound pressure amplitude levels for the pump signals (solid line) and their two higher harmonics $2f_{1(1-5)} = 476, 480, 484, 488, 492$ kHz (dashed line) and $3f_{1(1-5)} = 714, 720, 726, 732, 738$ kHz (dashed line) are presented.

Fig. 2. The resulting main lobes of the sectoral DC of the model of the section of the ring row of RAD in the azimuthal plane.

————— For pump signals $f_{1(1-5)} = 238, 240, 242, 244, 246$ kHz;
 - - - - - for their 2 harmonics $2f_{1(1-5)} = 476, 480, 484, 488, 492$ kHz;
 - - - - - for their 3 harmonics $3f_{1(1-5)} = 714, 720, 726, 732, 738$ kHz

Fig. 3. The resulting main lobe of the sectoral DC in the azimuthal plane for DFS $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}| = 25$ kHz

The ratios of the levels of normalized distributions correspond to the conditions of the experiment, in particular the placement of the measuring hydrophone at a distance of 4 m from the EAP 1–5 model. In the experiment, a sequential increase in the frequencies of

the probing pump signals was specified: $f_{1(1)} = 238$ kHz, $f_{1(2)} = 240$ kHz, $f_{1(3)} = 242$ kHz, $f_{1(4)} = 244$ kHz, $f_{1(5)} = 246$ kHz when changing the echo search direction from left to right, i.e., the partial main lobes in sectoral DC are "different frequencies", and the same applies to two higher harmonics $2f_{1(1-5)}$ and $3f_{1(1-5)}$. If we take the central EAC 3 as the origin of coordinates (0°) in the sectoral DC of the model of the site of the ring row of RAD, it is clear that, for example, for the extreme left (-12°) and right ($+12^\circ$) directions of the echo search in the aquatic environment, it is possible to synchronously generate pulsed irradiation with different "frequency colors": $f_{1(1)} = 238$ kHz, $2f_{1(1)} = 476$ kHz, $3f_{1(1)} = 714$ kHz and $f_{1(5)} = 246$ kHz, $2f_{1(5)} = 492$ kHz, $3f_{1(5)} = 738$ kHz. As follows from Fig. 2, partial main lobes for signals of multiple frequencies are coaxial, but differ in both the angular width of the maxima for the same amplitude levels, for example (-3 dB): $\theta_{0.7(f_1)} = 5.8^\circ$; $\theta_{0.7(2f_1)} = 3.8^\circ$; $\theta_{0.7(3f_1)} = 2.6^\circ$, and side field level: $P_{6n(f_1)} = -11$ dB, $P_{6n(2f_1)} = -20$ dB, $P_{6n(3f_1)} = -43$ dB.

In Fig. 2, it can be seen that the fluctuations of the levels of the partial main lobes in the azimuthal plane in the region of the resulting maximum of sectoral DC for signals $f, 2f, 3f$ were no more than 3, 7, 9 dB, respectively, which is caused by the choice of the separation angle (6°) of the acoustic axes of the EAC model of the section of the ring row of RAD. The angular width at the -3 dB level of the resulting main lobes of sectoral DC in the azimuth/elevation plane for signals $f, 2f, 3f$ is $\approx 30^\circ / 6^\circ$; $28^\circ / 3.8^\circ$; $27.7^\circ / 2.6^\circ$, respectively, and it is obvious that both multi- and mono-frequency resulting main lobes of a more complex shape can be implemented.

In Fig. 3, the normalized distribution of the sound pressure amplitude level for the difference frequency signal (DFS) $F_{-i} = |f_{2i} - f_{1i}| = 25$ kHz is presented in the Cartesian coordinate system "amplitude – direction of echo search" and is similar to that discussed above.

The angular width of the resulting main lobe of the sectoral DC in the azimuthal/elevation plane for the DFS is also $\approx 30^\circ/6$ at the -3 dB level, and in this case there is practically no lateral radiation.

Until now, PEA has been used in long-range echo search systems as a compact source of only a low-frequency signal, which has small values of both the level of lateral radiation and the angular width of the

main lobe, the value of which $\theta_{0.7(F)}$ at level 0.7 is determined by the width of the main lobe of the EAC at frequencies f_1, f_2 . There are also known disadvantages of this mode of emission of a probing signal of a difference frequency (DFS): low efficiency, weakly directional reception of echo signals, a significant level of acoustic noise in the operating range (it is absent for the emerging high-frequency $f_+ = f_2 + f_1$, $2f_2, 2f_1$ spectral components, the use of which can provide additional information in shallow waters).

ASSESSMENT OF INCREASING EFFECTIVENESS OF PARAMETRIC RADIATION MODE (PRM) APPLICATION

Let us carry out a comparative calculation for a typical EAC in the PRM using LF and HF components emerging in the aquatic environment — signals of the difference (DFS) and sum (SFS) frequencies. We will also evaluate the energy characteristics of active location systems that use these signals.

The sound pressure $P_+(r)$ for the SFS on the PEA axis can be determined from the formula:

$$P_+(r) = \frac{\varepsilon \omega_+ P_{01} P_{02} l_{\text{д}}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0.25 \ln^2(1 + z_{\text{н}}^2) + \arctg^2 z_{\text{н}}}{1 + z_{\text{н}}^2}} e^{-\beta_+ r}, \quad (1)$$

where $\omega_+ = 2\pi f_+ = 2\pi(f_1 + f_2) = 4\pi f_0$, [Гц] is the cyclic frequency of the SFS; P_{01}, P_{02} — amplitudes of sound pressure of biharmonic pumping signals at the EAC surface, [Pa]; ρ_0, c_0 — the values of the equilibrium density and speed of sound propagation in water, respectively; $l_{\text{д}} = a^2 \omega_0 / 2c_0$ — diffraction distance at the central pump frequency $f_0 = c_0 / \lambda_0 = (f_1 + f_2) / 2$, [m]; $\varepsilon = 3.5$ — nonlinear water parameter; a — radius of the EAC aperture, [m]; $z_{\text{н}} = r / l_{\text{д}}$ — normalized distance r ; β_+ — attenuation coefficient of the SFS, [Np/m]. Note that nonlinear effects of self-action and interaction arise when intense ultrasonic pump waves with frequencies f_1, f_2 propagate in an aquatic environment. This sets the range of wave sizes D / λ from 10 to $15.1 \times 10^3 / \sqrt{P_0}$ for a reversible EAC of a parametric emitting antenna (PEA).

At distances $r > 2l_{\text{д}}$, the sound pressure $P_-(r)$ for DFS is described by the expression [14]:

$$P_-(r) = \frac{\varepsilon \Omega P_{01} P_{02} L_{\text{д}}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{\ln^2 \left(\frac{L_{\text{д}}}{l_{\text{д}}} z_{\text{н}} \right) + \frac{\pi^2}{4}}{1 + (L_{\text{д}} / l_{\text{д}})^2 z_{\text{н}}^2}} e^{-\beta_- r}, \quad (2)$$

where $\Omega = 2\pi F_- = 2\pi(f_1 - f_2)$, [Гц] is the cyclic frequency of the DFS; $L_{\text{д}} = a^2 \Omega / 4c_0$ — diffraction distance for DFS, [m]; β_- — attenuation coefficient for DFS.

Fig. 4 shows calculated graphs of the distributions of sound pressure amplitudes P_+ , P_- for signals of the sum ($f_+ = 550$ kHz) and difference ($F_- = 50$ kHz) frequencies generated on the acoustic axis by one of the RAD EAC. As can be seen from Fig. 4, these signals have the same amplitude at a distance of ≈ 340 m. At shorter distances, the level of the SFS frequency is higher than the amplitude of the DFS, for example, at distances of 10 and 100 meters — by 26 dB and 18 dB, respectively.

Fig. 4. Graphs of the distributions of sound pressure amplitudes P_+ , P_- VS the signals of the sum f_+ and difference F_- frequencies for the acoustic axis of the EAC

Let us compare the energy characteristics of this EAC used in the PRM for DFS and SFS, which can be used as working location signals. It is known that the energy range of hydroacoustic equipment is determined by the sonar equation [15]

$$P_c = \delta P_n, \quad (3)$$

where P_c is the sound pressure of the echo signal at the reception point, [Pa]; P_n — sound pressure of interference, [Pa]; $\delta = \sqrt{2} K_{\delta} / \sqrt{\Delta F T}$ — the recognition coefficient, in which K_{δ} is the reception reliability coefficient, i.e., minimum permissible ratio of signal voltage to noise voltage at the indicator input; ΔF — passband of the receiving path, [Hz]; T — signal averaging time, taken in practice to be equal to the duration of the probing pulse τ , [s].

Acoustic noise in reservoirs at frequencies above 100–200 kHz is determined by thermal noise associated with the movement of water molecules. The intensity of thermal noise in a certain frequency band, received by a directional reversible EAC, is determined from the expression

$$I_{\text{ш}} = I' \frac{\Delta f}{\gamma} = I' \frac{1.15 \Delta F}{\gamma}, \text{ where } I' \approx a_l f^2 \text{ is the intensity of plane acoustic waves per frequency band unit causing an effect equivalent to thermal excitation of}$$

a non-directional hydrophone by the environment; $a_l = 16\pi k_{\delta} T_{\Lambda} / c^2$, $T_{\Lambda} = 273.18 + T$, where T_{Λ} is the absolute temperature, [K]; k_{δ} , [J/K] — Boltzmann constant; Δf , ΔF — noise band and passband of the receiving path, respectively, [Hz]; γ — coefficient of axial concentration of reversible EAC.

Then, for PRM using the SFS with short durations of the probing signal, the noise interference pressure P_n can be determined from the expression $P_n = P'(\Delta f / \gamma)^{1/2}$, where $P' = (I' \rho_0 c_0)^{1/2}$, [Pa]. The left side of equation (3), which represents the sound pressure of the echo signal of the SFS at the reception point, is determined taking into account the characteristics of the PRM under consideration, since the distribution of sound pressure of the SFS towards the target and back is described by different dependences. Accordingly, the echo sound pressure for the SFS at the reception point is determined from the expression

$$P_c = \frac{P_+(r) R_s}{2r} e^{-\beta_+ r},$$

where $P_+(r)$ is the sound pressure level of the SFS at a point r in the axial direction, [Pa]; r — distance to target, [m]; R_s — effective radius of the target, sonar object (SO), conditionally replaced by an equivalent reflective ultrasonic sphere, [m].

After substituting the expressions discussed above for δ , P_n and P_c for the sonar equation into (3), we have:

$$\frac{P_+(r) R_s}{2r} e^{-\beta_+ r} = \frac{\sqrt{2} k_{\delta}}{\sqrt{\tau \Delta F}} \frac{P' \sqrt{1.15 \Delta F}}{\sqrt{\gamma}}. \quad (4)$$

The sonar equation, presented in the form (4), makes it possible to analyze the energy characteristics of active location systems, which use sounding SFS and DFS. For this purpose, it is necessary to calculate the maximum detection distances r for objects with given effective radii R_s for existing sound pressure levels: interference at the receiving point $P_{n\pm}$, operating signals of the sum and difference frequencies $P_{\pm}(r)$ at the point r . We will carry out the indicated calculation for a locator with a standard EAC in the PRM with the following characteristics.

DFS: pumping frequencies $F_- = 50$ kHz, $f_2 = 300$ kHz; the angular width of the main lobe of the EAC DC is 6° in the emission mode, 40° in the receiving mode (the diameter of the EAC is $2a = 65$ mm); emitting pulse duration $\tau = 1$ ms; level of normalized interference $P_{n0} = 0.1$ and reliability

coefficient $K_s = 2$; amplitude of sound pressure of pump signals at the antenna surface $P_0 = P_{01}, P_{02} = 2.52 \times 10^5$ Pa.

SFS: $f_+ = 550$ kHz; angular width of the DC main lobe — 3.5° in the emission mode, 2.5° in the receiving mode (diameter of the EAP is $2a = 65$ mm); thermal noise pressure level $P' = 2 \times 10^4$ Pa in the receiving pathband $\Delta F = 1$ kHz.

Fig. 5 shows the calculated dependencies with recalculation of the effective radius R_s due to the target $T_s = 20 \lg(R_s/2)$ for a locator with a standard EAC made of RAD, where the sign (+) denotes the curve for PRM at SFS $f_+ = 550$ kHz, and the sign (–) marks the straight line for PRM at DFS $F_- = 50$ kHz. Each dependence divides the field in Fig. 5 into two areas — the upper (in which the locator with the EAC in PRM is effective for detection) and the lower (in which the locator with the EAC not effective in PRM).

Fig. 5. Calculated dependences of the maximum detection distances r for objects with given values of target strength T_s for a locator with EAC in the PRM for the SFS $f_+ = 550$ kHz and for the DFS $F_- = 50$ kHz

CONCLUSIONS

From the analysis of the presented curves it follows that it is more expedient to use PRM for the SFS (than for the DFS) when detecting objects with a target strength of up to -18 dB at distances up to 460 m. [16, Tab. 1.3] presents the results of experimental measurements of the effective scattering area of single objects, in particular the calculated values of the effective radius R_s and target strength T_s , the detection of which in the security zone of the water area is relevant. For example, the target force T_s for

a log standing vertically in water, with a diameter of 15 cm and a length of 150 cm, is about -34 dB, for a vertical wooden pole — -42 dB, for a swimmer in a vertical position — -22 dB, for a hollow rubber sphere with a diameter of 12 cm and a wall thickness of 2 mm — -38 dB). Note that all these objects have a target strength value less than -18 dB, which confirms the validity of the first conclusion. For example, for a swimmer (-22 dB) we draw a horizontal line from the value (-22 dB) on the vertical axis T_s to the intersection with the calculated dependencies (+) and (–), then we project the intersection points onto the horizontal axis of distance r and obtain about 420 m and 300 m, respectively. The gain in energy detection range for the SFS (at distances less than 460 m) is due to an increase in the emission/reception directivity, a decrease in the level of acoustic signals in the pass-band of the receiving path, as well as the efficiency of generating probing SFS.

As noted in [4], for a zonal hydroacoustic station (ZHAS) with a depth of protected water area of 2 to 60 m, the normalized level of noise interference at a frequency of 1 kHz in a band of 1 Hz up to 0.04 Pa and a signal emission level of at least 160 dB:

- the maximum detection range of the intruder must be selected from the range 100, 200, 300, 400, 500 m and then in increments of 100 m;
- viewing sector of the protected water area in the azimuthal plane for one ZHAS must be at least 60° and selected from the range: $60^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$;
- the field of view of the ZHAS in the elevation plane should be from 2° to 30° ;
- the number of simultaneously tracked hydroacoustic targets of one ZHAS must be at least 2.

As follows from the materials presented above, the use of antenna devices using the effects of nonlinear acoustics for quantized examination of a water volume with adjustable angular resolution and "frequency coloring" of given directions of echo search in the azimuthal/elevation plane may be promising for increasing the efficiency of hydroacoustic means in coastal shallow waters.