

УДК 551.46.086, 534.222.2

© Е. В. Волощенко, 2024

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТОВ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ ДЛЯ ПРИБРЕЖНОГО СЕГМЕНТА ОБЩЕЙ СИСТЕМЫ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА

В статье проведен анализ возможностей и потребностей дистанционного мониторинга шельфа в прибрежном сегменте Глобальной системы наблюдения за океаном (ГСНО) с применением систем и методов измерений рассеяния ультразвуковых (гидроакустика) и электромагнитных (радиолокация) волн морской поверхностью. Основное внимание уделено проектированию технических основ ультразвукового способа мониторинга водоемов, в котором реализованы режимы облучения УЗ-сигналами со стороны дна обследуемой акватории с использованием различных эффектов нелинейной акустики. В рамках возможностей решения обратной задачи рассеяния — определения параметров морской поверхности по характеристикам рассеянных ею сигналов — основное внимание уделено применимости избирательного ("резонансного") механизма обратного рассеяния, соответствующего условию Брэгга – Вульфа. На основе анализа имеющихся результатов предложено расширить возможности способа измерения параметров взволнованной морской поверхности, перспективного к использованию в прибрежном сегменте общей системы морского мониторинга.

Кл. сл.: параметрическая излучающая антенна, гидроакустический мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о ветровых волнах и течениях в водной среде является основной целью осуществляемых морских наблюдений на акваториях портов, гаваней и заливов. Это требует разработки новых методов исследований, проведения лабораторных и натурных испытаний новых приборов и осуществления телеметрии данных в реальном времени. Изменения прибрежных процессов в пространстве и времени требуют применения дистанционных методов наблюдений на акваториях достаточно больших размеров, в частности и разработки технических основ приборов, инструментов, систем и методов измерений для осуществления динамического ультразвукового (УЗ) мониторинга водоемов. Как показывает практика, до сих пор изучение закономерностей для прибрежных процессов в основном базируется на получении и накоплении усредненно-точечных результатов эпизодических морских измерений, осуществляемых с помощью измерительной техники на различных физических принципах.

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Следует отметить, что в настоящее время разработаны международные соглашения, призы-

вающие к эффективному управлению морской средой, устойчивому использованию ее ресурсов, оперативному выявлению и прогнозированию изменений и т.д., технически закрепленные созданием Глобальной системы наблюдения за океаном (ГСНО) [1], которая структурно состоит из океанического и прибрежного сегментов. При разработке и поэтапной реализации прибрежного сегмента определен комплекс переменных параметров, которые должны быть измерены с достаточной пространственно-временной разрешающей способностью, а также обработаны в реальном масштабе времени: направления и величины поверхностных ветров, температуры воздуха и воды, уровень моря, потоки течений в водной среде, поверхностные ветровые течения и волны и т.д. Для реализации как дистанционного зондирования, так и измерений на местах в прибрежном сегменте [1] предложено использовать комбинации из пяти категорий элементов мониторинга: 1) стационарные лаборатории на берегу [2]; 2) мареографы [3, 4]; 3) неподвижные плавучие платформы [5] и заякоренные буи (Triaxys Directional Wave [6, 7], Directional Waverider [8]), дрейфующие по течению измерительные устройства [9], подводные движущиеся средства [10–12]; 4) научно-исследовательские и промысловые суда [13], попутные суда и добровольные суда наблюдений (ДСУ, Sea Keepers [14]) [15]; 5) спутники, самолеты

и наземные платформы [16, 17], а также сочетание различных элементов, например, [18].

В рамках анализа рассмотренных выше потребностей дистанционного зондирования в прибрежном сегменте полезно сопоставить рассеяние УЗ и электромагнитных (ЭМ) волн морской поверхностью. Отметим, что общей целью исследований в этой области является изучение возможностей решения обратной задачи рассеяния — определения параметров морской поверхности по характеристикам рассеянных ею сигналов. Так, коротковолновое (КВ) радиолокационное зондирование основано на рассеянии ЭМ-излучения от взволнованной границы раздела, спектр колебаний которой почти всегда содержит длины морских волн, соизмеримые с длиной волны ЭМ-излучения радара. Это обуславливает применимость в измерениях "резонансного" механизма обратного рассеяния, соответствующего условию Брэгга — Вульфа. Известно, что величина интенсивности отраженного поля от случайной поверхности с пологими и малыми высотами неровностей (в сравнении с длиной волны облучения) прямо пропорционально зависит как от угла визирования, так и спектральной плотности на данной частоте облучения) [19]

$$I \sim 16\pi k^4 B(\beta) S(K_{\text{пов изб}}), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число и λ — длина излучаемого УЗ- или ЭМ-сигнала; $B(\beta)$ — функция угла визирования, зависящая от типа границы раздела (для УЗ) и вида поляризации (для ЭМ); β — угол падения, т.е. между направлением облучения и нормалью к поверхности (угол визирования); $S(K_{\text{пов изб}})$ — значение спектральной плотности на резонансной частоте.

$$K_{\text{пов изб}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{пов изб}}} = \frac{2k \sin \beta}{n}, \quad \lambda_{\text{пов изб}} = \frac{\lambda \cdot n}{2 \sin \beta}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{пов изб}}$ — "резонансная" длина поверхностной ветровой волны; n — порядок пространственного спектра.

Отсюда следует, что при моностатической схеме облучения радаром со стационарного пункта-вышки на побережье (угол падения $\beta \sim 90^\circ$) взволнованной морской поверхности можно за счет избирательного обратного брэгговского рассеяния первого порядка ($n = 1$) зарегистрировать спектральную компоненту волнения, для которой $\lambda_{\text{пов изб}} = \lambda / 2$, причем это широко используется в практике измерений при радиолокационном определении спектра морских волн в КВ-радиодиапазоне [16].

В то же время для частотного диапазона применения УЗ в гидролокации (1÷100) кГц пространственные периоды волн в водной среде составят от 1.5 м до 15 мм, причем для того, чтобы обеспечить направленное излучение зондирующего сигнала (ширина основного лепестка характеристики направленности (ХН) около 4°) в водную среду на принципах "линейной" акустики будут необходимы гидроакустические антенны диаметрами от 23 м до 0.23 м соответственно! Особенно впечатляет первая цифра, причем для обеспечения в водной среде длин волн излучения до десяти метров необходимо уменьшать нижнюю границу гидролокационного диапазона. Очевидно, что в данном случае оправдано применение эффектов нелинейной акустики, в частности, параметрической излучающей антенны (ПИА), формирующей в водной среде низкочастотный сигнал перестраиваемой разностной частоты для длинноволнового облучения взволнованной границы раздела со стороны дна, что значительно упростит техническую реализацию метода. В данном случае обратно рассеянный сигнал будет определяться обнаруживаемыми спектральными составляющими взволнованной поверхности с волновыми числами $K_{\text{пов изб}}$, которые подчиняются условию избирательного ("резонансного") рассеяния (2).

Продолжим анализ характеристик измерительной аппаратуры для пятого элемента мониторинга прибрежного сегмента, в котором используется ЭМ-излучение коротких радиоволн (КВ-диапазон частот, МГц / длина волны в атмосфере, м — 3/100 ÷ 30/10) или сверхвысокой частоты (СВЧ, частота ГГц/длина волны в атмосфере, см — 2.45/12) [20–23]. Еще в 1965 г. предложен способ измерения высоты морского волнения с летательного аппарата [24] путем облучения морской поверхности ВЧ-энергией и регистрации отраженных от нее сигналов, при котором измеряется отношение когерентной и некогерентной составляющих отраженного сигнала $U_{\text{ког}}/U_{\text{неког}} = f(h/\lambda)$, где h — высота морского волнения, а λ — длина излучаемой ЭМВ. Способ реализован в самолетном импульсном моностатическом радиолокаторе КВ-диапазона, снабженном выпускной антенной в виде провода длиной $L = \lambda / 2$ с шириной основного лепестка ($\sim 70\text{--}80^\circ$) на уровне 0.5 мощности, который ориентирован перпендикулярно к морской поверхности. Устройство используется в метеорологии, океанографии, морской навигации и т.д., реализуя глобально-площадной масштаб регистрации параметров морского волнения [25]. В приборе рекомендованы следующие значения частот, МГц/длина радиоволны, м — (30/10, 10/30, 5/60) тракта излучения для диапазонов (0–3) м, (1.5–9) м, (3–20) м измеряемых высот морских волн. Отмечено, что для обеспечения достаточной точности

измерения высоты волн (во всем диапазоне возможных высот) необходимо иметь возможность перестроения частоты генератора или иметь три фиксированные частоты ЭМ-излучения. В процессе испытаний было предусмотрено использовать три фиксированные частоты ЭМ-излучения 4.5, 10, 30 МГц.

Очевидно, что и в этом случае может быть оправдано применение эффектов нелинейной акустики, в частности ПИА, формирующей в водной среде низкочастотный сигнал перестраиваемой разностной частоты (волны разностной частоты, ВРЧ) для длинноволнового облучения взволнованной границы раздела по нормали со стороны дна.

К недостаткам РЛ-способа и реализующих его устройств можно отнести то, что расстояние от берега до исследуемых районов морской поверхности составляло (15–20) км, так что это достаточно сложно отнести к измерениям для прибрежного модуля. Обработка результатов показала, что среднеквадратичная погрешность измерения высоты морских волн с помощью радиолокационного прибора с борта самолета не превышает 10%, результаты измерения практически не зависят от высоты, скорости и направления полета самолета относительно главного направления бега морских волн. К недостаткам РЛ-метода следует отнести недостаточную величину разрешающей способности для прибрежных измерений. Так, в [16] отмечено, что для радиолокаторов с диапазоном частот ЭМ (12÷25) МГц для дальностей до ~ (42÷83) км величина разрешения по горизонтали составляла (1÷3) км, а на частоте 5 МГц при дальности ~ 200 км — горизонтальное разрешение около (5÷10) км. В СВЧ-диапазоне радар дистанционного моностатического зондирования с синтезированной апертурой (SAR, Synthetic Aperture Radar, микроволновый прибор для получения изображений высокого разрешения при любом состоянии атмосферы — облачность, пыльная погода и солнечная засветка) обеспечивает измерение характеристик поверхностных течений, обнаружение нефтяных разливов и т.д. при площадях обзора от (100×100) км до (500×500) км при разрешающей способности от десятков метров до 100 км.

Следует отметить, что для других мониторинговых элементов, в том числе и с использованием УЗ-эхометода, аналогичных данных по разрешающей способности измерений для прибрежного сегмента не обнаружено, что дает основание считать их точноно распределенными. Из представленного выше анализа возможностей дистанционного зондирования в прибрежном сегменте видна общность физических основ при рассеянии УЗ (гидроакустика) и ЭМ (радиолокация) волн морской поверхностью, что обуславливает возмож-

ность совместного практического применения. Однако для получения сведений о закономерности изменения удаления облучаемых границ раздела в УЗ-эхометод используется вертикальное/слабонаклонное направление облучения при моностатической схеме. Это является ограничением УЗ-способа. Для получения более полного объема сведений о параметрах движения взволнованной границы раздела вода – воздух над большей площадью донной поверхности необходимо также использовать наклонное облучение границы раздела УЗ-сигналом снизу вверх при бистатической схеме, что потребует "сетевого" размещения на дне нескольких пространственно разнесенных приемоизлучающих антенных устройств (ПАУ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗБИРАТЕЛЬНОМУ РАССЕЯНИЮ ВРЧ АКУСТИЧЕСКИ МЯГКОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПЛАСТИНОЙ-ОТРАЖАТЕЛЕМ

Из (1) и (2) вытекает возможность определения параметров пространственного спектра морской поверхности, который характеризует процесс волнения. Для реализации этой возможности необходимо облучать поверхность под фиксированным углом β на различных частотах с учетом (2) и измерять интенсивность отраженного сигнала. Можно также изменять угол визирования β при нескольких фиксированных значениях длин УЗ ВРЧ, формируемых ПИА, причем для обеспечения угловой избирательности ширина основного лепестка ХН должна быть постоянной в рабочем диапазоне и не превышать нескольких градусов. Как отмечено в [26], основной вклад в обратно рассеянный сигнал вносят элементы волнового профиля (точки A' , A на рис. 1 и т.д.), для которых выполняется условие избирательного рассеяния Брэгга – Вульфа, т.е. выполняется условие интерференционного сложения (2) когерентных сигналов, отраженных в обратном направлении (рис. 1, разность хода должна быть равна половине длины ВРЧ $\Lambda_{\text{изб}}/2$, что соответствует возникновению интерференционного максимума в отраженных лучах).

Из рис. 1 видно, что изменение направления облучения от наклонного к нормальному (увеличение угла скольжения χ до 90°) приводит к уменьшению разности хода, т.е. это обуславливает "избирательность" для ВРЧ с увеличивающейся частотой/уменьшающейся длиной в водной среде. В [27] описаны результаты измерений в гидроакустическом бассейне угловых и частотных зависимостей для нормированных значений амплитуд ВРЧ при обратном избирательном береговом рассеянии от акустически мягких

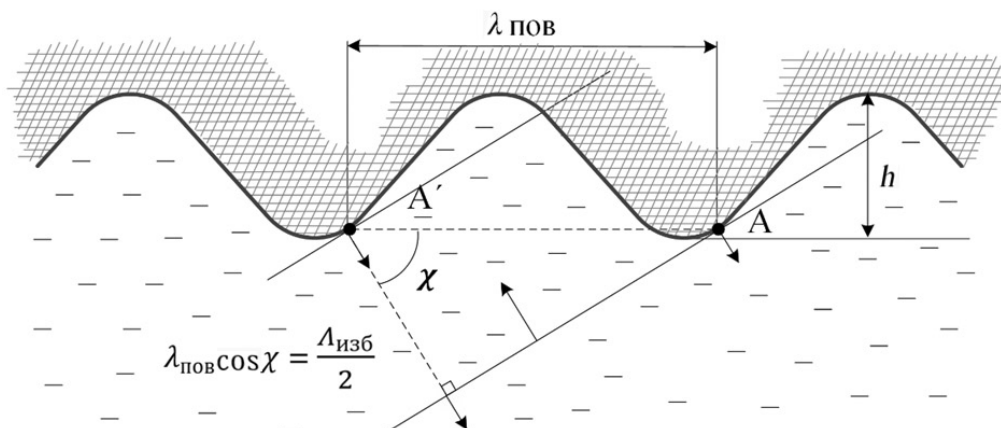


Рис. 1. Геометрия интерференционного усиления в воде при обратном избирательном рассеянии ВРЧ [26] пластиной-отражателем с синусоидальным профилем (заштрихована). Длина поверхностной волны $\lambda_{\text{пов}}$ и высота неровностей h

пластин-отражателей с синусоидальным профилем неровностей (модели малых неровностей: $\lambda_{\text{пов}} = 0.012$ м и $h = 4$ мм, $\lambda_{\text{пов}} = 0.006$ м и $h = 2$ мм) на облучаемой грани. Диапазоны изменения: углы визирования β в диапазоне (30° – 70°); частота

ВРЧ / длина ВРЧ — 50 кГц / 30 мм, 200 кГц / 7.5 мм; длительности зондирующих импульсов (50–200) мкс; пьезоэлемент электроакустического преобразователя (ЭАП) накачки ПИА диаметром 20 мм с центральной частотой 2.5 МГц.

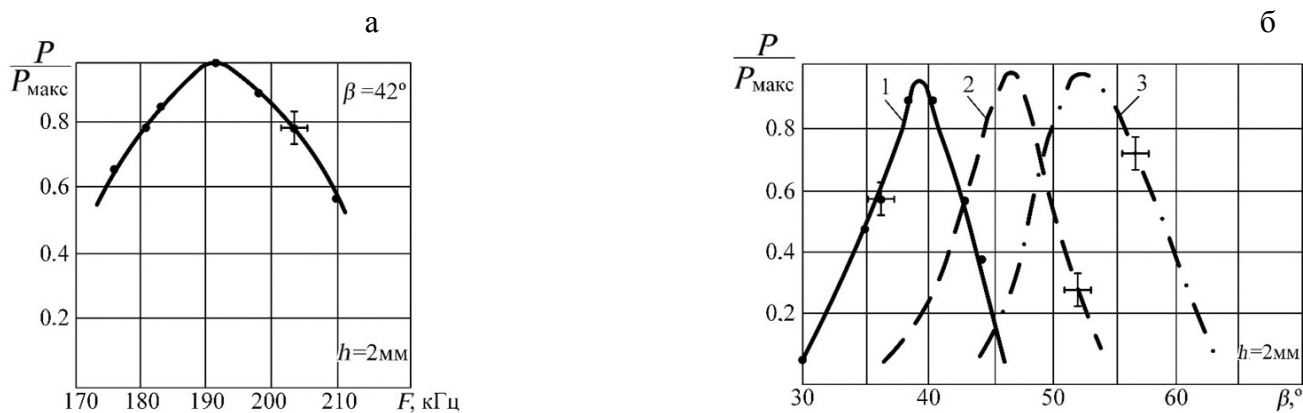


Рис. 2. Графики нормированных амплитуд $P/P_{\text{макс}}$ при избирательном рассеянии сигнала ВРЧ облучаемой пластиной-отражателем синусоидального профиля с длиной поверхностной волны $\lambda_{\text{пов}} = 6$ мм и высотой неровностей $h = 2$ мм (модель малых неровностей).

а — амплитудно-частотная зависимость (АЧЗ): диапазон ВРЧ от 175 кГц до 210 кГц, "избранная" (резонансная) ВРЧ $F_{\text{изб}} = 192$ кГц, полоса пропускания АЧЗ по уровню 0.7 около 30 кГц, угол визирования $\beta = 42^\circ$; б — три амплитудно-угловые зависимости (АУЗ 1, 2, 3): "избранные" (резонансные) длины волн ВРЧ $\lambda_{\text{изб}}$ / частота ВРЧ $F_{\text{изб}} = 7.5$ мм / 200 кГц, 8.57 мм / 175 кГц, 10 мм / 150 кГц соответственно; диапазон изменения угла визирования β от 30° до 65° (углы визирования $\beta_{\text{изб}}$ для максимумов обратного рассеяния АУЗ 1, 2, 3 примерно равны 39° , 46° , 53°) [27]

Экспериментальные графики (рис. 2) получены при различных длинах $\Lambda_{\text{изб}}$ ВРЧ (кривые 1, 2, 3 — 7.5 мм, 8.57 мм, 10 мм, рис. 2, б) в диапазоне изменения угла визирования β (от 30° до 65°), а также при фиксированном угле визирования $\beta = 42^\circ$ (рис. 2, а) в диапазоне изменения частоты УЗ-облучения ВРЧ (от 175 кГц до 215 кГц). Анализ результатов подтверждает соответствие расположения нормированных максимумов отраженных сигналов условию резонанса (2); совпадение расчета и эксперимента составляет (10–20)%; графики кривых имеют выраженный резонансный характер, что подтверждает наличие избирательного механизма рассеяния. Таким образом, по отраженному сигналу с "избирательно-рассеянными" компонентами можно получить информацию о периодичности неровностей модельных пластин-отражателей за счет подбора параметров УЗ-облучения как по направлениям волнового вектора ВРЧ ($\cos \chi$) относительно границы раздела, так и по длинам ВРЧ (Λ) в водной среде. По мнению авторов [27], угловые и частотные зависимости отраженного пучка ВРЧ, формируемого ПИА, позволяют численно оценить спектр морского волнения. Далее, в [27] описаны результаты оценочных исследований зависимости механизма избирательного рассеяния от соотношения между величинами высот неровностей h и длин облучающей ВРЧ Λ , однако количественных данных не представлено. Так, при увеличении h/Λ , начиная с $h/\Lambda > 1$, резонансная картина становится менее выраженной — максимумы "расплываются", возрастает уровень отражений в промежутках между резонансными частотами и для "избирательного" рассеяния не соблюдается резонансное условие (2). Однако объяснения причин возникновения данных результатов не представлено, заключительный этап методики измерений — возможность подстройки длины волны Λ зондирующего сигнала ВРЧ под характеристики имеющегося морского волнения на данном этапе исследователи [27] не сформулировали. Тем не менее обратное избирательное рассеяние позволяет давать практические рекомендации по выбору длины волны Λ ВРЧ при реализации режима наклонного моностатического облучения в акустическом способе измерения параметров морского волнения.

СПОСОБЫ МНОГОПОЗИЦИОННОГО УЗ-МОНИТОРИНГА ВОДНОЙ СРЕДЫ

Упомянутые выше мониторинговые элементы [1], при реализации которых используются УЗ-эхоимпульсные лоаторы, применяемые для получения необходимой информации о параметрах слоистой водной среды, должны обладать на рабо-

чих частотах калиброванным акустическим трактом с известным пространственным распределением амплитуд звукового давления в пределах основного лепестка ХН. Более того, для проведения исследований тонкой структуры поверхностного волнения необходимо иметь возможность регулировки разрешаемого элемента водного пространства, который определяется произведением разрешающих способностей — по дистанции и по углу. Таким образом, пригодность формируемого в водной среде акустического тракта ограничивается величиной облучаемого измерительного объема, который определяется размером и рабочей частотой антенной системы, длительностью импульса, а также схемой эхолокации "снизу вверх" УЗ-сигналами (моностатическая или бистатическая). Например, осуществление по моностатической схеме (излучатель и приемник объединены) замеров изменения профиля бегущей поверхностной ветровой волны обеспечивает только двумерность регистрации во времени. Использование наклонного облучения границы раздела УЗ-сигналом при бистатической схеме эхопоиска (излучатель и приемник пространственно разнесены) потребует увеличения плотности размещения на донной поверхности нескольких пространственно разнесенных излучателей и приемников. Реализация данного подхода может позволить регистрировать как трехмерную картину течений в слоистой морской среде, так и динамику изменения характеристик поверхностного волнения на прибрежной акватории большой площади.

Проведем анализ сообщений о способах многопозиционного УЗ-мониторинга и локационных устройствах, их реализующих. Гидролокационная система наблюдения для обнаружения пловцов на прибрежном мелководье включает в себя, кроме береговой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), и набор однотипных ПАУ [28]. ПАУ размещены в водной среде с соблюдением условия минимизации УЗ-помех взаимного влияния за счет секторного облучения каждым из них "своего" участка водного пространства. ЭАП, из которых собраны ПАУ с плоской апертурой, функционируют на зондирующих сигналах в заданном диапазоне частот, создавая УЗ-барьер из перекрывающихся пространственных областей облучения вокруг охранной зоны. Предполагается, что ПАУ могут быть размещены в акватории на донной поверхности/заглубленных платформах, в связи с чем области облучения формируются направленными вертикально/горизонтально УЗ-пучками, причем из описания неясно, как создают барьер — поэтапно, т.е. поэлементно, или одновременно, т.е. целиком. Ограничениями данного многопозиционного способа УЗ-мониторинга являются:

1) применение в ПАУ только режима моноста- тической эхолокации, что обеспечивает только двумерность регистрации информации во времени;

2) наличие помех взаимного влияния за счет малой полосы пропускания ЭАП, используемых в моночастотных ПАУ;

3) низкая эффективность использования излу- чаемой УЗ-энергии вследствие того, что отсутст- вует возможность как регулировки разрешаемого элемента пространства, так и оперативного изме- нения направлений УЗ-пучков для увеличения концентрации подсветки обнаруженного объекта поиска на произвольном направлении относительно охранной зоны.

В то же время перспективным является опыт применения в гидролокационной системе наблю- дения "сетевого" размещения на донной поверхно- сти нескольких пространственно разнесенных ПАУ.

В [29] описан УЗ-способ обнаружения вторже- ния подводного объекта в акваторию прибрежного водоема с применением режима "бистатического" эхопоиска. С помощью акустически жестких отражателей, располагаемых на воображаемой эллиптической линии, задают в вертикальной плоскости контролируемую область водоема. В фокусах эллипса размещают гидроакустические излучатель и приемник таким образом, что их кру- говые ХН с одинаковой чувствительностью по звуковому давлению также находятся в верти- кальной плоскости. Как излучатель, так и прием- ник УЗ-волн выполнены в виде секционированной многоэлементной антенной конструкции цилинд- рической формы из моночастотных ЭАП. Опера- тор с помощью возбуждения отдельных секций гидроакустического излучателя последовательно посылает УЗ-импульсы по различным направле- ниям к установленным отражателям. Особенности геометрии эллиптической границы контролируемой области приводят к тому, что импульсные УЗ- сигналы при распространении к приемнику пере- крывают своими индивидуальными трассами рас- пространения вертикальную зону контролируемой водной акватории. Оператор анализирует отобра- жаемые на индикаторе кругового обзора с раз- верткой типа Р (в зарубежной терминологии инди- катор типа РРІ — Plan Position Indicator) серии информационных импульсов. При наличии под- водного объекта в некотором секторе соответст- вующий импульс на экране пропадет, что указы- вает на наличие цели, а также позволит после об- работки определить местоположение, курс и ско- рость движения объекта. Ограничениями данного многопозиционного способа УЗ-мониторинга яв- ляются:

1) сложная схема организации облучения кон- трольруемой области натурального водоема, которая

по сути является плоской, что обеспечивает только двумерность регистрации информации во време- ни;

2) наличие помех взаимного влияния за счет малой полосы пропускания ЭАП, используемых в моночастотных антенных конструкциях;

3) отсутствует возможность как выбора необ- ходимого разрешаемого элемента пространства, так и оперативного изменения направлений УЗ- пучков для увеличения концентрации подсветки обнаруженного объекта поиска на произвольном направлении относительно охранной зоны.

В то же время в рассмотренном способе является передовым применение режима "бистатического" эхопоиска, что позволяет эффективно перекрывать вертикальную зону контролируемой водной аква- тории. Однако в обоих способах многопозицион- ного УЗ-мониторинга и локационных устройствах, их реализующих, конструкция ПАУ не может обеспечить решение задачи исследования динами- ки изменения характеристик поверхностного волнения на прибрежной акватории большой площади.

ГИДРОАЭРОДРОМ КАК ПРИБРЕЖНЫЙ СЕГМЕНТ ГСНО

Описание сети и режимов работы

Перспективным по использованию в составе подсистемы наблюдения для прибрежного сегмен- та является УЗ-способ подготовки водного объема летного бассейна гидроаэродрома [30], в рамках которого возможно измерение параметров мор- ского волнения [31]. Для подсистемы наблюдения прибрежного сегмента используют импульсную локацию УЗ, излучаемым снизу вверх посредст- вом сетевой донной структуры из необходимого количества ПАУ полусферической формы [32] (рис. 3). В [33] представлен подробный анализ применения гидроакустических систем активной локации с ПАУ, которые используют в режиме моноста- тической эхолокации как для обнаружения надводных и подводных объектов, так и удален- ного получения информации о гидроусловиях в различных точках акватории.

На дне прибрежной акватории размещены пять одинаковых ПАУ (І), связанных электрически как друг с другом, так и с береговым постом, из кото- рых четыре периферийных (направления север – юг, восток – запад) образуют вокруг центрального плоскую пространственную структуру квадратной формы с длинами сторон около двойной глубины прибрежной акватории. Особенности функцио- нирования рассматриваемого УЗ-способа (рис. 3) состоят в том, что в областях расположения каждого

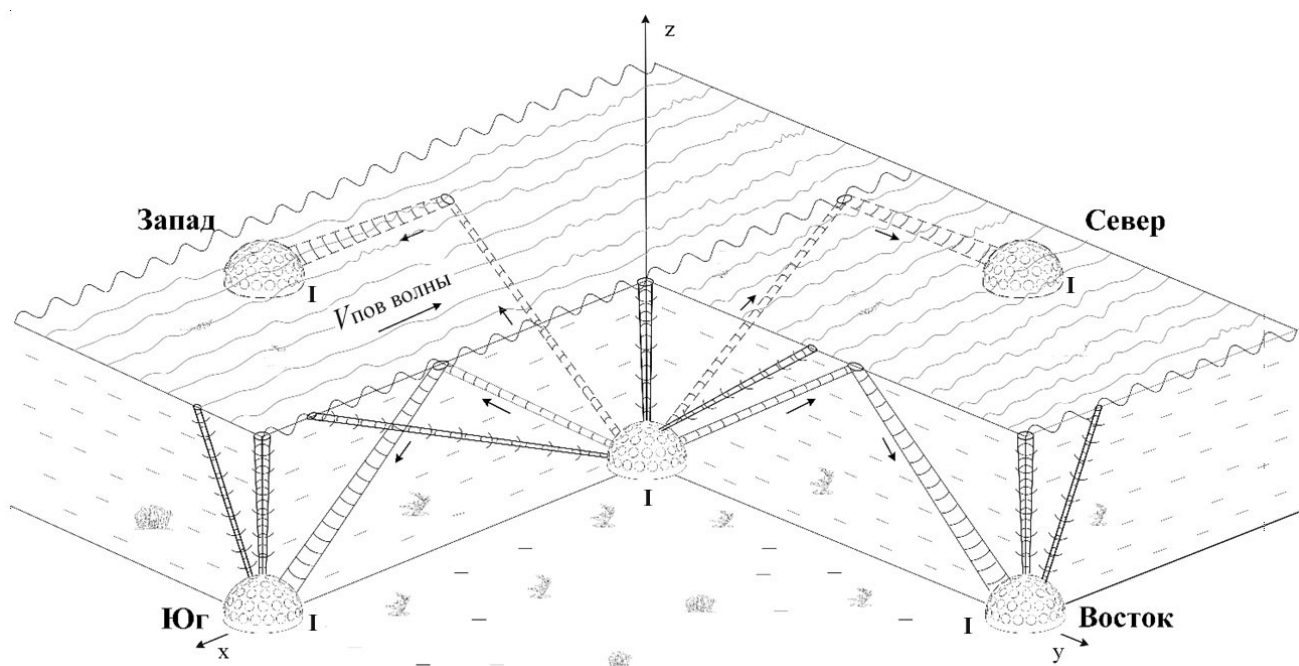


Рис. 3. Сетевая донная структура из 5 ПАУ (I) для подсистемы наблюдения прибрежного сегмента и удаленного получения информации о гидроусловиях в различных точках акватории

ПАУ (I) реализуется несколько режимов облучения УЗ-сигналами со стороны дна обследуемой акватории: обращенного моностатического эхолота, наклонных моностатического и бистатического облучений (для двух периферийных ПАУ (I), находящихся на заднем плане, схематичное изображение режимов облучения не выполнено).

Наиболее наглядно принцип удаленного получения информации о гидроусловиях в различных точках акватории и используемые режимы облучения иллюстрируются на рис. 3 за счет "четвертого" выреза водной среды, который расположен на переднем плане. Итак, над каждым ПАУ осуществляется измерение параметров морского волнения при реализации режима обращенного моностатического эхолота, т.е. нормального облучения УЗ-импульсами участка границы раздела вода – воздух с использованием обратимых ЭАП. Это позволит зарегистрировать динамику изменения прибрежных волновых процессов в пространстве и времени за счет дистанционных наблюдений на акватории достаточно большого размера, что актуально при разработке аппаратуры и поэтапной реализации измерений в прибрежном сегменте.

Далее, над каждым ПАУ сетевая донная структура позволит в соответствии с эффектом Доплера осуществить измерения по обнаружению генерального направления бега и скорости поверхно-

стных волн за счет их наклонного облучения снизу вверх при моностатической схеме эхопоиска, причем для этого необходимо посредством ПАУ сформировать две взаимноперпендикулярные антенные системы типа "Янус". С этой целью на полусфере ПАУ выбирают две пары "оппозитно-диаметральных" обратимых ЭАП, расположенных на пересечениях заданной параллели и двух взаимноперпендикулярных меридианов. Акустические оси всех четырех пучков имеют одинаковые углы наклона относительно горизонта, находясь попарно во взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях, проходящих через ось симметрии донного ПАУ (I). Ориентацию взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостей относительно сторон света можно изменять за счет коммутации ЭАП (на рис. 3 для упрощения изображения у каждого ПАУ показано по одному пучку для наклонного моностатического облучения). Кстати, любой пучок для режима наклонного моностатического облучения может быть использован для измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ — зависимостей амплитуд эхосигналов в заданной полосе частот ВРЧ) для заданного участка границы раздела, расположение которого определяется выбранным значением угла наклона облучения относительно горизонта, причем величина последнего при измерении АЧХ в рамках

отдельной серии остается неизменной (см. рис. 2, а). Далее, любой пучок для режима наклонного моностатического облучения также может быть использован и для измерения амплитудно-угловых характеристик (АУХ — зависимостей амплитуд эхосигналов в диапазоне изменения величин углов Θ_d наклона облучения относительно горизонта) на нескольких выбранных и различных ВРЧ для протяженного участка границы раздела вода — воздух, причем величина выбранного значения излучаемой ВРЧ при измерении АУХ в рамках отдельной серии остается неизменной (см. рис. 2, б).

И наконец, режим наклонного бистатического облучения ВРЧ со стороны дна: центральный ПАУ снизу вверх под заданным углом наклона относительно горизонта одновременно облучает четырьмя лучами (по два во взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях) четыре участка взволнованной границы раздела, синхронно запуская в береговой аппаратуре прием рассеянных морской поверхностью импульсов УЗ, которые "засвечивают" сверху вниз ЭАП, образующих апертуры четырех периферийных ПАУ. Известно [34], что каждое из четырех переизлученных границей раздела полей ВРЧ является суперпозицией двух компонент — регулярной (когерентной) вблизи направления зеркального отражения и случайной (некогерентной), направления которой охватывают всю нижнюю полусферу, причем превалирование одной компоненты над другой позволяет оценить степень неровности поверхности моря, т.к. их соотношение определяется соразмерностью длины волны Λ облучающей ВРЧ и высоты h бегущей поверхностной волны.

Подчеркнем: здесь новым и оригинальным заключительным этапом методики измерений для подсистемы наблюдения прибрежного сегмента и удаленного получения информации о гидроусловиях в различных точках акватории является применение эффектов нелинейной акустики, в частности ПИА как измерительного инструмента, формирующего в водной среде зондирующий сигнал ВРЧ, длину волны Λ которого можно подстраивать под характеристики имеющегося морского волнения, изменяя соотношения указанных компонент до необходимых в измерениях пропорций [35].

Оценочный расчет параметров избирательно рассеянных ВРЧ для режима наклонного моностатического облучения

Допустим, что ЭАП, образующие одно из "меридиональных" направлений в ПАУ (I) (рис. 3), возбуждаются по заданной программе бигармоническими электрическими сигналами с частотами 239.5, 242.5, 245.5, 254.5, 257.5, 260.5 кГц [36],

которые произвольно образуют пары f_1, f_2 . Это позволит, например, сформировать в водной среде для каждого ЭАП "частотно окрашенное" УЗ-излучение основных лепестков ХН в угломестной плоскости для ВРЧ $F = |f_1 - f_2| / \Lambda$:

3 кГц / 50 см; 6 кГц / 25 см; 9 кГц / 16.7 см;
12 кГц / 12.5 см; 15 кГц / 10 см; 18 кГц / 8.3 см;
21 кГц / 7.14 см,

причем их акустические оси могут располагаться как "оппозитно", так и в плоскости заданного "меридиана" под разными углами скольжения $\chi = 82^\circ, 74^\circ, 66^\circ, 58^\circ$ и т.д., отсчитываемыми относительно горизонта.

Предполагая, что оптимально осуществлять облучение выделенной полосы на участке границы раздела для получения информации о спектре морского волнения именно на избирательно рассеиваемых (интерференционно-усиленных, а не интерференционно-ослабленных) ВРЧ, рассмотрим один из вариантов. Например, в одном меридиане для нескольких фиксированных величин углов облучения χ_0 (скольжения) $82^\circ, 74^\circ, 66^\circ, 58^\circ$ за счет излучения ВРЧ с частотами 12 кГц (0.125 м), 9 кГц (0.167 м), 6 кГц (0.25 м), 3 кГц (0.5 м) соответственно, а затем регистрации избирательно рассеянных сигналов можно выделить диапазон (0.3–0.47) м из спектра волнения, причем для полосы границы раздела длиной около 16 м при глубине акватории 10 м.

Из этих данных следуют практические выводы:

1) при наклонном моностатическом облучении в режиме избирательного рассеяния возможно и целесообразно формирование ВРЧ для частотно-окрашенных "парциальных" лепестков в результирующей ХН ПАУ, что актуально при УЗ-мониторинге слоистой водной среды и морской поверхности со стороны дна;

2) качественно-оценочные измерения рассеянного поля ВРЧ демонстрируют, что для наклонного моностатического облучения в режиме избирательного рассеяния необходимо учитывать возможность изменения длины волны используемого УЗ-облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность обсуждаемой тематики подтверждают зарубежные публикации [37–40]. Так, опубликованы в [37] результаты серии экспериментов по измерению рассеяния морской поверхности в режиме наклонного бистатического облучения ВРЧ (4, 8 и 15 кГц), проведенных на мелководье с использованием ПИА (центральная частота накачки 40 кГц) в качестве источника и приемной горизонтальной линейной антенны. Эксперимен-

тальные измерения заключались в регистрации поверхностного рассеяния на трех частотах ВРЧ для малых углов скольжения относительно горизонта (13° , 20° и 30°), причем на протяжении длительного периода, что сопровождалось изменениями параметров водной поверхности. В этой статье подробно описаны как методика, так и результаты экспериментов для прямого рассеяния (bistatic forward scattering strength) морской поверхностью. Полученные данные показывают, что направление распространения ветровой волны оказывает существенное влияние на поверхностное прямое рассеяние; для всех углов скольжения установлено, что флуктуации силы рассеяния из-за условий окружающей среды уменьшаются по мере того, как частота УЗ-сигнала ВРЧ увеличивается. Следует отметить, что в [37] не указаны возможности практического приложения осуществленных измерений, в частности, для разработки предлагаемого способа исследования характеристик морского волнения, тем не менее первый шаг в этом направлении по применению гидроакустических систем с режимом параметрического излучения осуществлен.

Тематика исследований, описанных в данной статье, является продолжением работ [31, 36, 41–43] и соответствует направлению исследований — разработка технических основ приборов, инструментов, систем и методов измерения в области акустики водных сред: излучение, прием и обработка звуковых сигналов, акустический мониторинг водоемов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Integrated, Strategic Design Plan for the Coastal Ocean Observations Module of the Global Ocean Observing System [Электронный ресурс]. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130523_rus (дата обращения 05.05. 2024).
2. Wave Sensor Technologies, St Petersburg, Florida, March 7-9, 2007: workshop proceedings [Электронный ресурс]. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/20871> (дата обращения 05.05. 2024).
3. Гидрологический измеритель ГМУ-2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optimum-lab.ru/product/stacionarnyj-gidrologicheskij-izmeritel-gmu-2-tajfun/> (дата обращения 05.05. 2024).
4. Волнограф ГМВ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bpp.by/product/volnograf-gmv/> (дата обращения 05.05. 2024).
5. Strong B.S., Brumley B.H., Mullison J.W. System and method of horizontal wave measurement. Патент США N US2006/0155492A1. 13.07.2006
6. Waves measurement systems test and evaluation protocols in support of national operation wave observation plan [Электронный ресурс]. URL: <https://drum.lib.umd.edu/items/18839fdd-31db-4166-b64f-5d5da23d39f3> (дата обращения 05.08. 2024).
7. Wave & current buoys [Электронный ресурс]. URL: <https://seasense.com.au/wave-current-buoys/> (дата обращения 05.05. 2024).
8. Directional Waverider 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://datawell.nl/products/directional-waverider-4/> (дата обращения 05.05. 2024).
9. Seaglider [Электронный ресурс]. URL: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/kongsberg-maritime/seaglider/31233-105713.html> (дата обращения 05.05. 2024).
10. Щеглов С.Г. Подводный планер. Патент РФ N RU176835U1. 30.01.18. URL: <https://patents.google.com/patent/RU176835U1/ru>
11. Кушнерик А.А., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат – носитель сменной полезной нагрузки. Патент РФ N RU2681415C1. 06.03.19. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2681415C1/ru>
12. Smith R.N. Geometric Control Theory and its Application to Underwater Vehicles [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/230686999_Geometric_Control_Theory_and_its_Application_to_Underwater_Vehicles (дата обращения 05.05. 2024).
13. Корсков И.В., Буланов В.А. Система многочастотного акустического зондирования. Патент РФ RU108642U1. 20.09.2011. URL: <https://patents.google.com/patent/RU108642U1/ru>
14. The International SeaKeepers Society [Электронный ресурс]. URL: <https://www.seakeepers.org/> (дата обращения 05.05. 2024).
15. Brumley B., Terray E., Strong B. System and method for measuring wave directional spectrum and wave height. Патент США US2008/0094940A1. 18.12.2007. URL: <https://patents.google.com/patent/US20080094940A1/en>
16. Pandian P.K., Emmanuel O., Ruscoe J.P. et al. An overview of recent technologies on wave and current measurement in coastal and marine applications // Journal of Oceanography and Marine Science. 2010. Vol. 1, iss. 1. Id. A6F669C4294. URL: https://academicjournals.org/journal/JOMS/edition/January_2010
17. Fung A.K., Zuffada C., Hsieh C.Y. Incoherent Bistatic Scattering from the Sea Surface at L-Band // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. May 2001. Vol. 39, no. 5. P. 1006–1012. DOI: 10.1109/36.921418
18. Soofi Kh.A., Berta D. Derivation of sea ice thickness using isostasy and upward looking sonar profiles. Патент N WO2015/089255A1. 09.12.14. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015089255A1/en>
19. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровных поверхностях. М.: Наука, 1972. 424 с.
20. Мушенко А.С., Самodelкова В.В., Панатов Г.С. Способ измерения сверхмалой высоты полета самолета, преимущественно гидросамолета, над водной поверхностью и параметров морского волнения. Патент РФ RU2183010C2. 27.05.2002. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2183010C2/ru>

21. Гарнакерьян А.А., Шепитько Г.Е., Бухарин В.Д., Ищенко В.Н. Устройство для измерения параметров морского волнения. Патент СССР SU632969A1. 16.11.78. URL: <https://patenton.ru/patent/SU632969A1>
22. Бухарин В.Д., Каишевский В.В. Устройство для измерения высоты морских волн с летательного аппарата. Патент РФ RU2104563C1. 10.02.98. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2104563C1/ru>
23. Прозоровский В.Е., Бухарин В.Д., Бурак В.А. Способ определения высоты морских волн с летательного аппарата на плавучесть. Патент РФ RU2046287C1. 20.10.95. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2046287C1/ru>
24. Зубкович С.Г. Способ измерения высоты морских волн с летательного аппарата. Патент СССР N 169808. 17.03.65. URL: <https://patentdb.ru/patent/169808>
25. Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С. Радиолокация морской поверхности. Изд-во Ростовского университета, 1978. 144 с.
26. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики (Пер. с англ.). Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
27. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
28. Dix J.F. Sonar surveillance system for shallow water. Патент Великобритании GB2240847A. 14.08.91. URL: <https://patents.google.com/patent/GB2240847>
29. Власов Ю.Н., Маслов В.К., Толстоухов А.Д., Цыганков С.Г. Способ обнаружения вторжения подводного объекта в контролируемую область природного водоема. Патент РФ RU2150123C1. 16.06.99. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2150123C1_20000527
30. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., Ли В.Г. Способ подготовки летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета. Патент РФ RU2464205C1. 20.10.12. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2464205C1/ru>
31. Волощенко В.Ю., Волощенко Е.В., Тарасов С.П. и др. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения. Патент РФ RU2721307C1. 18.05.20. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1_20200518
32. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство. Патент РФ RU104732U1. 20.05.11. URL: <https://patents.google.com/patent/RU104732U1/ru>
33. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., Волощенко Е.В. Акустический волнограф. Патент РФ RU168083U1. 17.01.2017. URL: <https://patents.google.com/patent/RU168083U1/ru>
34. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
35. Волощенко Е.В. Параметрическая излучающая антенна с многокомпонентным сигналом накачки для гидроакустического мониторинга мелководных водоемов // Научное приборостроение. 2024. Т. 34, № 2. С. 102–111. URL: <http://iairas.ru/mag/2024/abst2.php#abst10>
36. 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. URL: http://mhts.ru/data/ckfiles/files/ASO2021_%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%90%D0%A1%D0%9E-2021.pdf
37. Yang Z., Liu B., Qi L., White P.R., Li J., Kan G., Yu Sh. Measurement of bistatic sea surface scattering with a parametric acoustic source // Journal Acoustical Society of America. 2022. Vol. 151, iss. 4. P. 2474–2485. DOI: 10.1121/10.0010160
38. Wang L., Yu G., Liang M., Ren Y., Peng L. Experimental Measurement of Forward Scattering from Very Rough Sand Ripples in a Water Tank // Remote Sens. 2022. Vol. 14, iss. 16. Id. 3865. DOI: 10.3390/rs14163865
39. Qi L., Kan G., Liu B., Pei Y., Yang Z., Yu Sh. Sea-surface acoustic backscattering measurement at 6–25 kHz in the Yellow Sea // Acta Oceanol. Sin. 2020, Vol. 39, no. 3. P. 113–122. DOI: 10.1007/s13131-020-1539-7
40. Zhou H., Huang S.H., Li W. Parametric Acoustic Array and Its Application in Underwater // Sensors. 2020. Vol. 20, iss. 7. Id. 2148. DOI: 10.3390/s20072148
41. Волощенко Е.В., Волощенко В.Ю. Многочастотный доплеровский способ измерений скорости течений в водной среде. Патент РФ RU2795579C1. 05.05.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru>
42. Волощенко В.Ю., Волощенко Е.В., Тарасов С.П. и др. Акустический способ измерения параметров движения слоистой морской среды. Патент РФ RU2801053C1. 01.08.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2801053C1/ru>
43. Волощенко Е.В. Повышение эффективности гидроакустических средств обнаружения на прибрежной акватории за счет применения нелинейной акустики // Научное приборостроение. 2024. Т. 34, № 2. С. 67–76. URL: <http://iairas.ru/mag/2024/abst2.php#abst7>

Южный федеральный университет, г. Таганрог

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

Материал поступил в редакцию 26.07.2024

MEASUREMENT OF MOTION PARAMETERS OF AGITATED INTERFACE USING EFFECTS NONLINEAR ACOUSTICS FOR COASTAL SEGMENT COMMON MARINE MONITORING SYSTEM

E. V. Voloshchenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

The article analyzes the possibilities and needs of remote monitoring of the shelf in the coastal segment of the Global Ocean Surveillance System (GOS) using systems and methods for measuring the scattering of ultrasonic (sonar) and electromagnetic (radar) waves by the sea surface. The main attention is devoted to the design of the technical foundations of the ultrasonic method for monitoring water area, in which the modes of ultrasonic irradiation with signals from the bottom of the surveyed water area are implemented using various effects of nonlinear acoustics. Within the framework of the possibilities of solving the inverse scattering problem — determining the parameters of the sea surface by the characteristics of the signals scattered by it — the main attention is paid to the applicability of a selective ("resonant") backscattering mechanism corresponding to the Bragg – Wolfe condition. Based on the analysis of the available results, it is proposed to expand the possibilities of a method for measuring the parameters of the rough sea surface, which is promising for use in the coastal segment of the general marine monitoring system.

Keywords: parametric radiating antenna, sonar monitoring

REFERENCES

1. Unesdoc. *The Integrated, Strategic Design Plan for the Coastal Ocean Observations Module of the Global Ocean Observing System*. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000130523_rus (accessed 05.05. 2024).
2. AquaDocs. *Wave Sensor Technologies*, St Petersburg, Florida, March 7-9, 2007: workshop proceedings. URL: <https://aquadocs.org/handle/1834/20871> (accessed 05.05. 2024).
3. Optimum-lab. *Gidrologicheskii izmeritel' GMU-2* [Hydrological meter GMU-2]. URL: <http://www.optimum-lab.ru/product/stacionarnyj-gidrologicheskij-izmeritel-gmu-2-tajfun/> (accessed 05.05. 2024). (In Russ.).
4. Belprompribor. *Laboratornoe oburodovanie. Volnograf GMV* [GMW Wavegraph]. URL: <https://www.bpp.by/product/volnograf-gmv/> (accessed 05.05. 2024). (In Russ.).
5. Strong B.S., Brumley B.H., Mullison J.W. *System and method of horizontal wave measurement*. Patent USA N US2006/0155492A1. Prioritet 13.07.2006
6. University of Maryland. *Waves measurement systems test and evaluation protocols in support of national operation wave observation plan*. URL: <https://drum.lib.umd.edu/items/18839fdd-31db-4166-b64f-5d5da23d39f3> (accessed 05.08. 2024).
7. Seasense. *Wave & current buoys*. URL: <https://seasense.com.au/wave-current-buoys/> (accessed 05.05. 2024).
8. Datawell BV. *Directional Waverider 4*. URL: <https://datawell.nl/products/directional-waverider-4/> (accessed 05.05. 2024).
9. *Seaglider*. URL: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/kongsberg-maritime/seaglider/31233-105713.html> (accessed 05.05.2024).
10. Shcheglov S.G. *Podvodnyi planer* [Underwater planer]. Patent RF no. RU176835U1. Prioritet 30.01.18. URL: <https://patents.google.com/patent/RU176835U1/ru> (In Russ.).
11. Kushnerik A.A., Shcherbatyuk A.F. *Malogabaritnyi mnogofunktsional'nyi avtonomnyi neobitaemyi podvodnyi apparat – nositel' smennoi poleznoi nagruzki* [Compact multi-functional autonomous uninhabited underwater vehicle -carrier vehicle for replaceable actual load]. Patent RF no. RU2681415C1. Prioritet 06.03.19. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2681415C1/ru> (In Russ.).
12. Smith R.N. *Geometric Control Theory and its Application to Underwater Vehicles*. URL: https://www.researchgate.net/publication/230686999_Geometric_Control_Theory_and_its_Application_to_Underwater_Vehicles (accessed 05.05. 2024).
13. Korskov I.V., Bulanov V.A. *Sistema mnogochastotnogo akusticheskogo zondirovaniya* [Multi-frequency speaking system]. Patent RF no. RU108642U1. Prioritet 20.09.2011. URL: <https://patents.google.com/patent/RU108642U1/ru> (In Russ.).
14. SeaKeepers. *The International SeaKeepers Society*. URL: <https://www.seakeepers.org/> (accessed 05.05. 2024).
15. Brumley B., Terray E., Strong B. *System and method for measuring wave directional spectrum and wave height*. Patent USA US2008/0094940A1. 18.12.2007. URL: <https://patents.google.com/patent/US20080094940A1/en>

16. Pandian P.K., Emmanuel O., Ruscoe J.P. et al. An overview of recent technologies on wave and current measurement in coastal and marine applications. *Journal of Oceanography and Marine Science*, 2010, vol. 1, iss. 1, Id. A6F669C4294. URL: https://academicjournals.org/journal/JOMS/edition/January_2010
17. Fung A.K., Zuffada C., Hsieh C.-Y. Incoherent Bistatic Scattering from the Sea Surface at L-Band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, vol. 39, no. 5, pp. 1006–1012. DOI: 10.1109/36.921418
18. Soofi Kh.A., Berta D. *Derivation of sea ice thickness using isostasy and upward looking sonar profiles*. Patent WO no. WO2015/089255A1. 09.12.14. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015089255A1/en>
19. Bass F.G., Fuks I.M. *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnykh poverkhnostyakh* [Wave scattering on statistically uneven surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 424 p. (In Russ.).
20. Mushenko A.S., Samodelkova V.V., Panatov G.S. *Sposob izmereniya sverkhmaloi vysoty poleta samoleta, preimushchestvenno gidrosamoleta, nad vodnoi poverkhnost'yu i parametrov morskogo volneniya* [Method of measuring the ultra-low altitude of an airplane, mainly a seaplane, above the water surface and sea wave parameters]. Patent RF no. RU2183010C2. Prioritet 27.05.2002. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2183010C2/ru> (In Russ.).
21. Garnaker'yan A.A., Shepit'ko G.E., Bukharin V.D., Ishchenko V.N. *Ustroistvo dlya izmereniya parametrov morskogo volneniya* [Device for measuring sea wave parameters]. Patent USSR SU632969A1. Prioritet 16.11.78. URL: <https://patent.ru/patent/SU632969A1> (In Russ.).
22. Bukharin V.D., Kashevskii V.V. *Ustroistvo dlya izmereniya vysoty morskikh voln s letatel'nogo apparata* [Device for measuring height of sea waves from flying vehicle]. Patent RF RU2104563C1. Prioritet 10.02.98. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2104563C1/ru> (In Russ.).
23. Prozorovskii V.E., Bukharin V.D., Buryak V.A. *Sposob opredeleniya vysoty morskikh voln s letatel'nogo apparata na plavu* [Method of determination of sea wave height from flying vehicle when afloat]. Patent RF no. RU2046287C1. Prioritet 20.10.95. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2046287C1/ru> (In Russ.).
24. Zubkovich S.G. *Sposob izmereniya vysoty morskikh voln s letatel'nogo apparata* [Method of measuring the height of sea waves from an aircraft]. Patent USSR No. 169808. Prioritet 17.03.65. URL: <https://patentdb.ru/patent/169808> (In Russ.).
25. Garnaker'yan A.A., Sosunov A.S. *Radiolokatsiya morskoi poverkhnosti* [Sea surface radar]. Rostov-on-Don, RGU Publ., 1978. 144 p. (In Russ.).
26. Urick R.J. *Principles of Underwater Sound. 3rd edition*. Peninsula Publ, 2013. 442 p. (Russ. ed.: Urik R.Dzh. *Osnovy gidroakustiki*. Transl. from eng. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 448 p.).
27. Novikov B.K., Timoshenko V.I. *Parametricheskie anteny v gidrolokatsii* [Parametric antennas in sonar]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 256 p. (In Russ.).
28. Dix J.F. *Sonar surveillance system for shallow water*. Patent GB no. GB2240847A. Prioritet 14.08.91. URL: <https://patents.google.com/patent/GB2240847>
29. Vlasov Yu.N., Maslov V.K., Tolstoukhov A.D., Tsyganov S.G. *Sposob obnaruzheniya vtorzheniya podvodnogo objekta v kontroliruemuyu oblast' naturnogo vodoema* [Method for detection of intrusion of underwater object into monitored region of natural pool]. Patent RF no. RU2150123C1. Prioritet 16.06.99. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2150123C1_20000527 (In Russ.).
30. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P., Li V.G. *Sposob podgotovki letnogo basseina gidroaerodroma dlya vypolneniya vzleta i privodneniya gidrosamoleta* [Method of seadrome preparation for boatplane takeoff and surfacing]. Patent RF no. RU2464205C1. Prioritet 20.10.12. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2464205C1/ru> (In Russ.).
31. Voloshchenko V.Yu., Tarasov S.P., Pivnev P.P. et al. *Akusticheskii sposob i ustroistvo izmereniya parametrov morskogo volneniya* [Acoustic method and apparatus for measuring sea-wave parameters]. Patent RF no. RU2721307C1. Prioritet 18.05.20. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1_20200518 (In Russ.).
32. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P. *Mnogochastotnoe gidroakusticheskoe priemo-izluchayushchee antennoe ustroistvo* [Multi-frequency hydroacoustic receiving antenna device]. Patent RF no. RU104732U1. Prioritet 20.05.11. URL: <https://patents.google.com/patent/RU104732U1/ru> (In Russ.).
33. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P., Voloshchenko E.V. *Akusticheskii volnograf* [Acoustic wave graph]. Patent RF no. RU168083U1. Prioritet 17.01.2017. URL: <https://patents.google.com/patent/RU168083U1/ru> (In Russ.).
34. Evtyutov A.P., Mit'ko V.B. *Inzhenernye raschety v gidroakustike. 2-e izd., pererab. i dop.* [Engineering calculations in hydroacoustics. 2nd ed., rev. and suppl.]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 288 p. (In Russ.).
35. Voloshchenko E.V. [The multi-component pump signal's parametric transmitting antenna for shallow water hydroacoustic monitoring]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2024, vol. 34, no. 2, pp. 102–111. URL: <http://iairas.ru/mag/2024/abst2.php#abst10> (In Russ.).
36. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. [Measurement of sea wave characteristics based on the application of nonlinear acoustic effects]. *Materialy 6 Vserossiiskoi konf. molodykh uchenykh i spets.: "Akustika sredi obitaniya (ASO-2021)"* [Proc. 6th all-Russ. conf. young sci. and spec. "Habitat Acoustics (ASO-2021)"], Moscow, Bauman MSTU, 2021. pp. 70–75. URL: http://mhts.ru/data/ckfiles/files/ASO2021_%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%90%D0%A1%D0%9E-2021.pdf (In Russ.).
37. Yang Z., Liu B., Qi L., White P.R., Li J., Kan G., Yu Sh. Measurement of bistatic sea surface scattering with a parametric acoustic source. *Journal Acoustical Society of*

- America*, 2022, vol. 151, iss. 4, pp. 2474–2485. DOI: 10.1121/10.0010160
38. Wang L., Yu G., Liang M., Ren Y., Peng L. Experimental Measurement of Forward Scattering from Very Rough Sand Ripples in a Water Tank. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, iss. 16, Id. 3865. DOI: 10.3390/rs14163865
39. Qi L., Kan G., Liu B., Pei Y., Yang Z., Yu Sh. Sea-surface acoustic backscattering measurement at 6–25 kHz in the Yellow Sea. *Acta Oceanol. Sin.*, 2020, vol. 39, no. 3, pp. 113–122. DOI: 10.1007/s13131-020-1539-7
40. Zhou H., Huang S.H., Li W. Parametric Acoustic Array and Its Application in Underwater. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 7, Id. 2148. DOI: 10.3390/s20072148
41. Voloshchenko E.V., Voloshchenko V.Yu. *Mnogochastotnyi doplerovskii sposob izmerenii skorosti techenii v vodnoi srede* [Multifrequency doppler method for measuring the speed of currents in the aquatic environment]. Patent RF no. RU2795579C1. Prioritet 05.05.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru> (In Russ.).
42. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. et al. *Akusticheskii sposob izmereniya parametrov dvizheniya sloistoi morskoi sredy* [Acoustic method for measuring motion parameters of the layered marine environment]. Patent RF no. RU2801053C1. Prioritet 01.08.2023. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2801053C1/ru>
43. Voloshchenko E.V. [The nonlinear acoustics application for the increasing of sonar's efficiency on shelf]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2024, vol. 34, no. 2, pp. 67–76. URL: <http://iairas.ru/mag/2024/abst2.php#abst7> (In Russ.).

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

Article received by the editorial office on 26.07.2024

INTRODUCTION

Obtaining information on wind waves and currents in the aquatic environment is the main objective of marine observations carried out in the waters of ports, harbors, and bays. This requires the development of new research methods, laboratory and field testing of new devices, and the implementation of data telemetry in real time. Changes in coastal processes in space and time require the use of remote observation methods in water areas of sufficiently large sizes, in particular, the development of technical foundations for devices, instruments, systems, and measurement methods for the implementation of dynamic ultrasonic monitoring of water bodies. As practice shows, until now the study of coastal processes is mainly based on obtaining and accumulating average-point results of episodic marine measurements carried out using measuring equipment based on various physical principles.

BRIEF OVERVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS

It should be noted that international agreements have now been developed calling for effective management of the marine environment, sustainable use of its resources, prompt detection and forecasting of changes, etc., technically secured by the creation of the Global Ocean Observing System (GOOS) [1], which structurally consists of oceanic and coastal segments. During the development and phased implementation of the coastal segment, a set of variable parameters has been determined that must be measured with sufficient spatio-temporal resolution, as well as processed in real time: directions and magnitudes of surface winds, air and water temperatures, sea level, current flows in the aquatic environment, surface wind currents and waves, etc. To implement both remote sensing and on-site measurements in the coastal segment [1], it is proposed to use combinations of five categories of monitoring elements: 1) stationary laboratories on the coast [2]; 2) tide gauges [3, 4]; 3) fixed floating platforms [5] and moored buoys (Triaxys Directional Wave [6, 7], Directional Waverider [8]), downstream drifting measuring devices [9], underwater vehicles [10–12]; 4) research and survey vessels [13], vessels of the way, and voluntary observation vessels (VOS, Sea Keepers [14]) [15]; 5) satellites, aircraft, and land platforms [16, 17], as well as a combination of various elements, for example, [18].

In the context of the analysis of the above-considered needs of remote sensing in the coastal segment, it is useful to compare the scattering of ultrasonic and electromagnetic (EM) waves by the sea surface. It should be noted that the general goal of research in this area is to study the possibilities of solving the inverse scattering problem — determining the

parameters of the sea surface by the characteristics of the signals scattered by the surface. Thus, short-wave (SW) radar sounding is based on the scattering of EM radiation from a rough interface, the oscillation spectrum of which almost always contains sea wave lengths commensurate with the wavelength of the radar EM radiation. This determines the applicability of the "resonance" backscattering mechanism in measurements, corresponding to the Bragg – Wulff condition. It is known that the magnitude of the intensity of the reflected field from a random surface with flat and small irregularities (in comparison with the wavelength of the radiation) is directly proportional to both the viewing angle and the spectral density at a given radiation frequency) [19]

$$I \sim 16\pi k^4 B(\beta) S(K_{\text{пов изб}}), \quad (1)$$

where $k = 2\pi/\lambda$ is the wave number and λ is the length of the emitted ultrasonic or electromagnetic signal; $B(\beta)$ is the viewing angle function, depending on the type of interface (for ultrasonic) and the type of polarization (for EM); β is the angle of incidence, i.e., between the direction of irradiation and the normal to the surface (viewing angle); $S(K_{\text{пов изб}})$ is the value of the spectral density at the resonant frequency.

$$K_{\text{пов изб}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{пов изб}}} = \frac{2k \sin \beta}{n}, \quad \lambda_{\text{пов изб}} = \frac{\lambda n}{2 \sin \beta}, \quad (2)$$

where $\lambda_{\text{пов изб}}$ is the "resonant" length of the surface wind wave; n is the order of the spatial spectrum.

Therefore, a monostatic scheme of radar irradiation from a stationary observation tower on the coast (angle of incidence $\beta \sim 90^\circ$) with a rough sea surface enables, due to selective first-order back Bragg scattering ($n = 1$), a record of the spectral component of the waves, for which $\lambda_{\text{пов изб}} = \lambda / 2$. This is widely used in the practice of measurements when determining the spectrum of sea waves in the SW radio range by radar [16].

For the frequency range of ultrasound in hydrolocation (1–100) kHz, the spatial periods of waves in the aquatic environment are from 1.5 m to 15 mm. In order to provide directional radiation of the probing signal (the width of the main lobe of the directivity pattern (DP) is about 4°) into the aquatic environment according to the principles of "linear" acoustics, hydroacoustic antennas with diameters from 23 m to 0.23 m, respectively, are necessary! The first figure is especially impressive, and in order to provide radiation wavelengths of up to ten meters in the aquatic environment, it is necessary to reduce the lower limit of the hydrolocation range. It is obvious that in this

event it is justified to use the effects of nonlinear acoustics, in particular, a parametric emitting antenna (PEA), which forms a low-frequency signal of a tunable difference frequency in the aquatic environment for long-wave irradiation of the agitated interface from the bottom. This significantly simplifies the technical implementation of the method. In this case, the backscattered signal is determined by the revealed spectral components of the agitated surface with wave numbers $K_{\text{пов нзб}}$ that obey the condition of selective ("resonant") scattering (2).

Let us continue the analysis of the characteristics of the measuring equipment for the fifth element of coastal segment monitoring, which uses EM radiation of short radio waves (SW frequency range, MHz / wavelength in the atmosphere, m — 3/100÷30/10) or super high frequency (SHF, frequency GHz / wavelength in the atmosphere, cm — 2.45/12) [20–23]. As early as 1965, a method was proposed for measuring the height of sea waves from an aircraft [24] by irradiating the sea surface with HF energy and recording the signals reflected, when the ratio of the coherent and incoherent components of the reflected signal is measured $U_{\text{кор}} / U_{\text{некор}} = f(h/\lambda)$, where h is the height of sea waves, and λ is the length of the emitted EMW. The method is implemented in an aircraft SW-range pulse monostatic radar equipped with a trailing antenna in the form of a wire with a length $L = \lambda / 2$ and a main lobe width of (~ 70 – 80)° at a power level of 0.5, which is oriented perpendicular to the sea surface. The device is used in meteorology, oceanography, marine navigation, etc., implementing a global-area scale for recording sea wave parameters [25]. The following frequency values, MHz/radio wave length, m are recommended for the device — (30/10, 10/30, 5/60) of the radiation path for the ranges (0–3) m, (1.5–9) m, (3–20) m of measured sea wave heights. It is noted that in order to ensure sufficient accuracy of wave height measurement (in the entire range of possible heights), it is necessary to have the ability to retune the generator frequency or have three fixed frequencies of EM radiation. During the tests, it was envisaged to use three fixed frequencies of EM radiation: 4.5, 10, 30 MHz.

It is obvious that in this case, the use of nonlinear acoustic effects can be justified, in particular, by PEA, which forms a low-frequency signal of tunable difference frequency (difference frequency waves, DFW) in the aquatic environment for long-wave irradiation of the agitated interface along the normal from the bottom.

The disadvantages of the radar method and the devices implementing it include the fact that the distance from the shore to the studied areas of the sea surface was (15–20) km, so it is quite difficult to attribute this to measurements for the coastal module. Processing of the results showed that the root-mean-square error in

measuring the height of sea waves using a radar device from an aircraft does not exceed 10%, the measurement results are practically independent of the altitude, speed and direction of the aircraft flight relative to the main direction of the sea wave run. The disadvantages of the radar method include insufficient resolution for coastal measurements. Thus, in [16] it is noted that for radars with the EM frequency range of (12÷25) MHz the horizontal resolution was (1÷3) km for distances of up to $\sim (42\div 83)$ km, and at a frequency of 5 MHz the horizontal resolution was about (5÷10) km at a distance of ~ 200 km. In the microwave range, the remote monostatic sensing radar with synthetic aperture (SAR, Synthetic Aperture Radar, a microwave device for obtaining high-resolution images in any atmospheric conditions — cloudiness, dusty weather, and solar illumination) ensures the measurement of surface current characteristics, detection of oil spills, etc. with coverage areas from (100×100) km to (500×500) km with a resolution from tens of meters to 100 km.

It should be noted that for other monitoring elements, including those using the ultrasonic echo method, similar data on the resolution of measurements for the coastal segment has not been found, which gives grounds to consider them pointwise distributed. From the above analysis of the possibilities of remote sensing in the coastal segment, the commonality of physical principles in the scattering of ultrasonic (hydroacoustics) and EM (radar) waves by the sea surface is evident, which determines the possibility of joint application. However, to obtain information on the pattern of change in the distance of the irradiated interfaces, the ultrasonic echo method uses a vertical/low-angle irradiation direction with a monostatic scheme. This is a limitation of the ultrasonic method. To obtain a more complete volume of information on the parameters of the motion of the roughened water-air interface over a larger area of the bottom surface, it is also necessary to use inclined irradiation of the interface with an ultrasonic signal from the bottom-up using a bistatic scheme, which will require a "network" arrangement of several spatially separated receiving and emitting antenna devices (RADs) on the bottom.

RESULTS OF EXPERIMENTS ON SELECTIVE SCATTERING OF DFW BY AN ACOUSTIC-SOFT PROFILED REFLECTOR PLATE

The possibility of determining the parameters of the spatial spectrum of the sea surface follows from (1) and (2). The spatial spectrum characterizes the process of roughness. To implement this possibility, it is necessary to irradiate the surface at a fixed angle β at different frequencies, taking into account (2), and measuring the intensity of the reflected signal. It is

also possible to change the viewing angle at several fixed values of the lengths of the ultrasonic DFW formed by the PEA. In order to ensure angular selectivity, the width of the main lobe of the DP must be constant in the operating range and not exceed several degrees. As noted in [26], the main contribution to the backscattered signal is made by the elements of the wave profile (points A', A in Fig. 1, etc.), for which the condition of Bragg – Wulf selective scattering is satisfied, i.e., the condition of interference addition (2) of coherent signals reflected in the opposite direction (Fig. 1, the path difference must be equal to half the DFW length $\Lambda_{\text{H36}}/2$, which corresponds to the occurrence of an interference maximum in the reflected beams).

From Fig. 1, it is evident that changing the direction of irradiation from oblique to normal (increasing the grazing angle χ to 90°) leads to a decrease in the path difference. This determines the "selectivity" for the DFW with increasing frequency/decreasing length in the aquatic environment.

Fig. 1. Geometry of interference amplification in water [26] by a reflector plate with a sinusoidal profile (shaded) for DFW selective backscattering. Surface wave length λ_{HOB} and irregularity height h

In [27] the results of measurements in a hydroacoustic pool of angular and frequency dependences for normalized values of the DFW amplitudes for selective Bragg backscattering from acoustically soft reflector plates with sinusoidal irregularity profile (small irregularity models: $\lambda_{\text{HOB}} = 0.012$ m and $h = 4$ mm, $\lambda_{\text{HOB}} = 0.006$ m and $h = 2$ mm) on the irradiated face. Variation ranges: viewing angles β in the range (30° – 70°); DFW frequency / length — 50 kHz / 30 mm, 200 kHz / 7.5 mm; sounding pulse durations (50–200) μ s; piezoelectric element of the electroacoustic transducer (EAT) for PEA pumping with a diameter of 20 mm and a central frequency of 2.5 MHz.

The experimental graphs (Fig. 2) were obtained for DFW different lengths of Λ_{H36} (curves 1, 2, 3 — 7.5 mm, 8.57 mm, 10 mm, Fig. 2, б) in the range of variation of the viewing angle β (from 30° to 65°), and a fixed viewing angle $\beta = 42^\circ$ (Fig. 2, а) in the range of frequency variation of the DFW ultrasound irradiation (from 175 kHz to 215 kHz).

Analysis of the results confirms that the location of the normalized maxima of the reflected signals corresponds to the resonance condition (2); the agreement

between calculation and experiment is (10–20)%; the curve graphs have a pronounced resonance character, which confirms the presence of a selective scattering mechanism. Thus, using the reflected signal with "selectively scattered" components, it is possible to obtain information on the periodicity of the irregularities of the model reflector plates by selecting the parameters of ultrasonic irradiation according to both the directions of the DFW vector ($\cos \chi$) relative to the interface and the DFW lengths (Λ) in the aquatic environment.

Fig. 2. Graphs of normalized amplitudes P/P_{max} for selective scattering of the DFW signal by an irradiated reflector plate with a sinusoidal profile, a surface wavelength $\lambda_{\text{HOB}} = 6$ mm, and an irregularity height $h = 2$ mm (small irregularities model). а — amplitude-frequency dependence (AFD): DFW range from 175 kHz to 210 kHz, "selected" (resonant) DFW $F_{\text{H36}} = 192$ kHz, the AFD passband at the 0.7 level is about 30 kHz, the viewing angle $\beta = 42^\circ$; б — three amplitude-angular dependences (AADs 1, 2, 3): "selected" (resonant) DFW wavelengths Λ_{H36} / frequency $F_{\text{H36}} = 7.5$ mm / 200 kHz, 8.57 mm / 175 kHz, 10 mm / 150 kHz, respectively; range of variation of the viewing angle β is from 30° to 65° (the viewing angles β_{H36} for the backscattering maxima of the AUZ 1, 2, 3 are approximately equal to 39° , 46° , 53°) [27]

According to the authors of [27], the angular and frequency dependences of the DFW reflected beam formed by the PEA allow one to numerically estimate the spectrum of sea waves. Further, in [27] the results of evaluation studies of the dependence of the selective scattering mechanism on the ratio between the values of the irregularity heights h and the lengths Λ of the irradiating TCG are described, however, quantitative data are not presented. Thus, with an increase h/Λ , starting from $h/\Lambda > 1$, the resonance pattern becomes less pronounced — the maxima "spread out", the level of reflections in the intervals between the resonant frequencies increases, and the resonance condition (2) is not met for "selective" scattering. However, no explanation of the reasons for the occurrence of these results is provided; the final stage of the measurement technique — the possibility of adjusting the wavelength Λ of the DFW probing signal to the characteristics of the existing sea waves — was not formulated by the researchers [27] at this stage. Nevertheless, backscattering allows us to give practical recommendations on the choice of the wavelength Λ of the DFW when implementing the inclined monostatic irradiation mode in the acoustic method of measuring the parameters of sea waves.

METHODS OF MULTI-POSITION ULTRASONIC MONITORING OF AQUATIC ENVIRONMENT

The above-mentioned monitoring elements [1] using ultrasonic echo-pulse locators to obtain the necessary information about the parameters of the layered aquatic environment, must have, at operating frequencies, a calibrated acoustic path with a known spatial distribution of the amplitudes of the sound pressure within the main lobe of the DP. Moreover, in order to conduct studies of the fine structure of surface waves, it is necessary to have the ability to adjust the resolvable element of the water space, which is determined by the product of the resolving powers: by distance and by angle. Thus, the suitability of the acoustic path formed in the aquatic environment is limited by the size of the irradiated measurement volume, which is determined by the size and operating frequency of the antenna system, the pulse duration, and the "bottom-upward" echolocation scheme with ultrasonic signals (monostatic or bistatic). For example, the implementation of a monostatic scheme (the emitter and receiver are combined) of measurements of the change in the profile of a traveling surface wind wave ensures only two-dimensionality of record over time. The use of oblique irradiation of the interface with an ultrasonic signal in a bistatic echo search scheme (the emitter and receiver are spatially separated) requires an increase in the density of placement of several spatially separated emitters and receivers on the bottom surface. The implementation of this approach can allow recording both a three-dimensional picture of currents in a layered marine environment and the dynamics of changes in the characteristics of wavy surface in a large coastal water area.

Let us analyze reports on methods of multi-position ultrasound monitoring and location devices using them. A hydrolocation surveillance system for detecting swimmers in coastal shallow waters includes, in addition to coastal electronic equipment (EE), a set of similar RADs [28]. RADs are placed in the aquatic environment in compliance with the condition of minimizing ultrasound mutual interference due to sectoral irradiation of the water area by each of them. The EATs, comprising the PAUs with flat aperture, work with probing signals within a given frequency range, creating an ultrasonic barrier of overlapping spatial irradiation areas around the security zone. It is assumed that the RADs can be placed in the water area on the bottom / underground platforms, the irradiation areas are formed by vertically/horizontally directed ultrasonic beams, and it is unclear from the description how the barrier is created — in stages, i.e., element by element, or at one time, i.e., as a whole. The limitations of this multi-position ultrasonic monitoring method are:

- 1) the use of only the monostatic echolocation mode in the RAD, which ensures only two-dimensional recording of information over time;

- 2) the presence of mutual interference due to the small passband of the EAT used in single-frequency RADs;

- 3) low efficiency of using the emitted ultrasonic energy due to the fact that there is no possibility of either adjusting the resolved element of medium or promptly changing the directions of ultrasonic beams to increase the concentration of illumination of the detected search object in an arbitrary direction relative to the security zone.

Nonetheless, the experience of using a "network" placement of several spatially separated RADs on the bottom in a sonar surveillance system is promising.

[29] describes an ultrasonic method for detecting the intrusion of an underwater object into the coastal reservoir water area using the "bistatic" echo search mode. Using acoustically rigid reflectors located on an imaginary elliptical line, a controlled area of the reservoir is defined in the vertical plane. At the foci of the ellipse, a hydroacoustic emitter and receiver are placed in such a way that their circular DPs with the same sensitivity to sound pressure are also in the vertical plane. Both the emitter and the receiver of ultrasonic waves are made in the form of a sectioned multi-element antenna structure of a cylindrical shape from monofrequency EATs. The operator, by means of excitation of separate sections of the hydroacoustic emitter, successively sends ultrasonic pulses in different directions to the installed reflectors. The peculiarities of the geometry of the elliptical boundary of the controlled area lead to the fact that the pulsed ultrasonic signals, when approaching the receiver, overlap the vertical zone of the controlled water area with their individual propagation paths. The operator analyzes the series of information pulses displayed on the circular view indicator with a P-type scan (in foreign terminology, the PPI, Plan Position Indicator). If there is an underwater object in a certain sector, the corresponding pulse on the screen will disappear, which indicates the presence of a target, and will also allow, after processing, to determine the location, course, and speed of the object. The limitations of this multi-position ultrasonic monitoring method are:

- 1) a complex scheme for organizing the irradiation of the monitored area of a natural reservoir, is essentially flat, which ensures only two-dimensional recording of information in time;

- 2) the presence of interference from mutual influence due to the small passbands of EATs used in single-frequency antenna designs;

- 3) there is no possibility of either selecting the required resolved element in medium or promptly changing the directions of ultrasonic beams to increase the concentration of illumination of the de-

tected search object in an arbitrary direction relative to the security zone.

At the same time, the considered method is advanced in using the "bistatic" echo search mode, which allows effectively covering the vertical zone of the monitored water area. However, in both methods of multi-position ultrasound monitoring and the location devices implementing them, the design of the RAD cannot provide a solution to the problem of studying the dynamics of changes in the characteristics of wavy surface in a large coastal water area.

HYDROAERODROME AS COASTAL GOOS SEGMENT

Description of the network and operating modes

The ultrasound method of preparing the water volume of the flight basin of a summer seaport [30] is promising for use in the monitoring subsystem for the coastal segment. This method enables the measurements of the parameters of sea waves [31]. For the monitoring subsystem of the coastal segment, they use pulsed ultrasound, emitted from the bottom up by means of a network bottom structure from the required number of hemispherical RADs [32] (Fig. 3).

Fig. 3. Network bottom structure of 5 RADs (I) for observation subsystem of the coastal segment and remote acquisition of information on hydrological conditions at various points in the water area

[33] contains a detailed analysis of the application of hydroacoustic active location systems of RADs, which are used in the monostatic echolocation mode both for detecting surface and underwater objects and for remotely obtaining information about hydrological conditions at various points in the water area.

Five identical RADs (I) are placed on the bottom of the coastal water area, electrically connected both to each other and to the coastal post, of which four peripheral ones (north-south, east-west directions) form a flat spatial structure of a square shape with side lengths of about twice the depth of the coastal water area around the central one. The peculiarities of the functioning of the considered ultrasonic method (Fig. 3) are that in the areas of location of each RAD (I) there are several modes of irradiation with ultrasonic signals from the bottom of the surveyed water area: inverted monostatic echo sounder, inclined monostatic and bistatic irradiation (for two peripheral RADs (I) located in the background, the schematic representation of the irradiation modes is not performed).

The principle of remote acquisition of information on hydrological conditions at various points of the

water area and in the various irradiation modes used is most clearly illustrated in Fig. 3 by means of the "quarter" cutout of the aquatic environment in the foreground. Thus, above each RAD, the parameters of sea waves are measured using the inverted monostatic echo sounder mode, i.e., normal irradiation of the water-air interface section with ultrasonic pulses using reversible EATs. This allows recording the dynamics of changes in coastal wave processes in space and time by means of remote observations over a sufficiently large water area. This approach is relevant when developing equipment and implementing stage-by-stage measurements in the coastal segment.

Further, above each RAD the network bottom structure allows, in accordance with the Doppler effect, to carry out measurements to detect the general direction of travel and the velocity of surface waves due to their oblique irradiation from the bottom up with a monostatic echo search scheme, and for this it is necessary to form two mutually perpendicular antenna systems of the "Janus" type by means of the RAD. For this purpose, on the RAD hemisphere, two pairs of "opposite-diametric" reversible EATs are selected, which are located at the intersections of a given parallel and two mutually perpendicular meridians. The acoustic axes of all four beams have the same angles of inclination relative to the horizon, being in pairs in mutually perpendicular vertical planes passing through the symmetry axis of the bottom RAD (I). The orientation of mutually perpendicular vertical planes relative to the cardinal directions can be changed by switching the EAT (in Fig. 3, to simplify the image, each RAD is shown with one beam for inclined monostatic irradiation). Incidentally, any beam for the inclined monostatic irradiation mode can be used to measure the amplitude-frequency characteristic (AFC — dependences of the echo signal amplitudes in a given frequency band of the DFW) for a given section of the interface, the location of which is determined by the selected value of the angle of inclination of the irradiation relative to the horizon, while the value of the latter remains unchanged when measuring the AFC within a separate series (see Fig. 2, a). Furthermore, any beam in the inclined monostatic irradiation mode can also be used to measure the amplitude-angular characteristics (AAC — dependences of the echo signal amplitudes in the range of changes in the values of the irradiation tilt angles Θ_d relative to the horizon) on several selected different DFWs for an extended section of the water-air interface, while the value of the selected value of the emitted DFW when measuring the AAC within a separate series remains unchanged (see Fig. 2, б).

And finally, the mode of inclined bistatic irradiation of the DFW from the bottom: the central RAD from the bottom up at a given angle of inclination relative to the horizon simultaneously irradiates four

sections of the rough interface with four beams (two in mutually perpendicular vertical planes), synchronously starting the reception of sea surface-scattered ultrasound pulses by the coastal equipment. The pulses "illuminate" the EAT from top to bottom, forming the apertures of four peripheral RADs. It is known [34] that each of the four DFW fields re-radiated by the interface is a superposition of two components — a regular (coherent) one near the direction of specular reflection and a random (incoherent) one, the directions of which cover the entire lower hemisphere, and the prevalence of one component over the other makes it possible to estimate the degree of roughness of the sea surface, since their ratio is determined by the proportionality of the wavelength Λ of the irradiating DFW and the height h of the traveling surface wave.

We emphasize: here the new and original final stage of the measurement technique for the coastal segment observation subsystem and remote acquisition of information on hydro-conditions at various points in the water area is the use of nonlinear acoustics effects, in particular, PEA as a measuring instrument that forms a DFW probing signal in the aquatic environment, the wavelength Λ of which can be adjusted to the characteristics of the existing sea waves, changing the ratios of the specified components to the proportions required in the measurements [35].

Estimated calculation of parameters of selectively scattered DFW for the inclined monostatic irradiation mode

Let us assume that the EATs forming one of the "meridional" directions in the RAD (I) (Fig. 3) are excited according to a given program by biharmonic electric signals with frequencies of 239.5, 242.5, 245.5, 254.5, 257.5, 260.5 kHz [36], which arbitrarily form pairs f_1, f_2 . This allows, for example, for each EAT in the aquatic environment, to form "frequency colored" ultrasonic radiation of the main lobes of the DP in the elevation plane for the DFW $F = |f_1 - f_2| / \Lambda$:

3 kHz / 50 cm; 6 kHz / 25 cm; 9 kHz / 16.7 cm;
12 kHz / 12.5 cm; 15 kHz / 10 cm; 18 kHz / 8.3 cm;
21 kHz / 7.14 cm,

while their acoustic axes can be located both "opposite" and in the plane of a given "meridian" at different grazing angles $\chi = 82^\circ, 74^\circ, 66^\circ, 58^\circ, 50^\circ$, etc., measured relative to the horizon.

Assuming that it is optimal to irradiate an allocated band on the section of the interface to obtain information about the spectrum of sea waves precisely on selectively scattered (interference-enhanced, not interference-weakened) DFWs, we consider one of the options. For example, it is possible to select a range of

(0.3–0.47) m from the agitation spectrum, notably for the interface band about 16 m long at a water depth of 10 m. The range can be selected in one meridian for several fixed values of irradiation (grazing) angles χ_0 of $82^\circ, 74^\circ, 66^\circ, 58^\circ$ due to the radiation of the DFW with frequencies of 12 kHz (0.125 m), 9 kHz (0.167 m), 6 kHz (0.25 m), 3 kHz (0.5 m), respectively, and subsequent recording of selectively scattered signals.

The following practical conclusions follow from these data:

1) in the event of the inclined monostatic irradiation in the selective scattering mode, it is possible and advisable to form the DFW for frequency-colored "partial" lobes in the resulting RAD DP, which is important for ultrasonic monitoring of the layered water environment and the sea surface from the bottom;

2) qualitative and evaluative measurements of the DFW scattered field demonstrate that for inclined monostatic irradiation in the selective scattering mode, it is necessary to take into account the possibility of changing the wavelength of the ultrasonic irradiation used.

CONCLUSION

The relevance of the discussed topic is confirmed by foreign publications [37–40]. Thus, the results of a series of experiments on measuring sea surface scattering in the mode of DFW inclined bistatic irradiation (4, 8, and 15 kHz) conducted in shallow water using a PEA (central pump frequency of 40 kHz) as a source and a receiving horizontal linear antenna are published in [37]. The experimental measurements consisted of recording surface scattering at three DFW frequencies for small grazing angles relative to the horizon ($13^\circ, 20^\circ$, and 30°) over a long period, which was accompanied by changes in the parameters of the water surface. This article describes in detail both the methodology and the results of experiments for bistatic forward scattering strength by the sea surface. The obtained data show that the direction of wind wave propagation has a significant effect on surface direct scattering; for all grazing angles, it was found that the fluctuations in the scattering strength due to environmental conditions decrease as the frequency of the DFW ultrasonic signal increases. It should be noted that in [37] the possibilities of practical application of the measurements carried out, in particular, for the development of the proposed method for studying the characteristics of sea waves, are not revealed; nevertheless, the first step in this direction for the application of hydroacoustic systems with a parametric radiation mode has been made.

The subject of the research described in this article is a continuation of the works [31, 36, 41, 42], and corresponds to the direction of research — development

of technical foundations of devices, instruments, systems, and methods of measurement in the field of acoustics of aquatic environments: radiation, reception and processing of sound signals, acoustic monitoring of water areas.