
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 551.46.086, 534.222.2

© Е. В. Волощенко, 2024

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЖИМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Проведен анализ ультразвуковых (УЗ) способов для измерения параметров морского волнения и технических характеристик реализующих их устройств. Основное внимание уделено перспективе использования "бестелесной" параметрической излучающей антенны (ПИА) в новом качестве — как инструмента для косвенной оценки степени неровности поверхности моря при проведении измерений гидроусловий на прибрежной акватории. Выбраны схема и методика измерений, аппаратура измерительной установки, что позволило провести калибровку используемой ПИА в диапазоне генерируемых волн разностной частоты, а также осуществить модельные эксперименты по изучению закономерностей рассеяния УЗ-поля при облучении нескольких акустически мягких пластин-отражателей, имеющих различные параметры синусоидального профиля неровностей. На основе анализа полученных результатов предложен способ измерения параметров взволнованной морской поверхности, например, для режима широкополосного бистатического облучения (излучатель и приемник разнесены в пространстве) УЗ-сигналами со стороны дна.

Кл. сл.: параметрическая излучающая антенна, рассеяние УЗ-волн на взволнованной границе раздела вода-воздух

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 морских испытаний различных приборов и осуществления телеметрии данных в реальном времени. Измерения поверхностного волнения на месте (*in situ*) являются составной частью программ экологического мониторинга, что актуально для калибровки и проверки усовершенствованных моделей прибрежного волнообразования, при проектировании, строительстве и оперативном планировании портов и гаваней и т.д., требуя накопления большого количества надежных и точных экспериментальных данных измерений высоты, периода и направления бега волн [1].

Существует несколько способов и реализующих их устройств для измерения этих параметров морской волны [2–5], среди которых традиционным инструментом являются гидроакустические эхоимпульсные локаторы в моностатическом режиме обращенного эхолота (*upward* или *up-looking sonar*) [6]. При этом электроакустический преобразователь (ЭАП) установлен на донной поверхности,

излучает вертикально вверх УЗ-импульсы, которые отражаются от границы раздела вода – воздух, расстояние до которой непрерывно изменяется по закону, характеризующему волнение моря. Это позволяет регистрировать в процессе измерений волновой профиль бегущей поверхностной ветровой волны, определить ее период, форму и высоту. Так, данным способом задачу решает прибор *Wavesonar* фирмы *ASL Environmental Sciences* (в основе разработки которого *Upward looking instrument, the Ice Profiling Sonar — IPS*, "вверхсмотрящий" сонар-профилограф нижней кромки льда) [7]. ЭАП установлен на крышке цилиндрического корпуса, излучает в воду в направлении нормали к границе раздела вода – воздух короткие импульсы УЗ-сигналов с частотой заполнения 420 кГц. ЭАП поршневого типа обеспечивает угловой растр $\theta_{0,7} = 1.8^\circ$ по уровню (–3 дБ) основного лепестка характеристики направленности (ХН), что позволяет обеспечить на поверхности моря как малый диаметр пятна облучения (0.9, 3.1 и 6.3 м для дистанций 30, 100 и 200 м соответственно), так и высокое пространственное разрешение по углу. Прибор устанавливают в составе приповерхностной буйковой станции на несущем буйе с поплавками, заглубленном от поверхности воды

на дистанцию до 225/55 м и закрепленном в необходимой точке подводного объема с помощью троса и донного якоря (глубина акватории до 2000 м). Высота волны измеряется прямым методом по временной задержке отраженного импульсного сигнала от поверхности воды, чем достигается достаточно высокая точность и достоверность измерений. Период волны измеряется в результате обработки серии экспериментальных наблюдений, полученных эхозондированием с периодичностью не менее двух измерений в секунду. Для измерения спектра направленности волнения требуется одновременно использовать три синхронизированных прибора, разнесенных по дну на некоторой базе и установленных в вершинах треугольника.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время наметилась тенденция объединения измерений характеристик поверхностных волн и течений [8–10] при осуществлении регулярного мониторинга на мелководной акватории, что потребовало разработки новых как технологий, так и приборов. В [11] представлены результаты подобных измерений с помощью устройств Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), установленных на донной поверхности, отличием которых является применение систем наклонных относительно вертикали лучей — "Janus" (четыре луча по сторонам света) и "Bugeye" (3+1: три луча, разнесенные на 120° в горизонтальной плоскости, плюс один вертикальный, как у волнографа).

Следует отметить, что, кроме выше отмеченного, предложено в конкретных реализациях устройств ADCP использовать УЗ-сигнал необходимой частоты, например большей величины — для мелководных участков, и наоборот, что позволит получать информацию о подводной обстановке с необходимой степенью детализации. Это достигается за счет дальнейшей модернизации конструкций ЭАП, основной подход к которой описан

в [12, 13]. Изначально решалась проблема рыбопоиска — исключение УЗ-помех взаимного влияния от гидролокаторов, установленных на соседних промысловых судах. Многорезонантность конструкции ЭАП обеспечивается за счет последовательного объединения пьезоэлектрических дисков одинакового/различного диаметра, составленных соосно торцами и скрепленных через центральные отверстия болтом-стяжкой. В местах соединений выведены электрические контакты, расположение которых от одного из его краев составляет соответственно восьмую, четвертую и половину от резонансной длины собранного ЭАП. По мнению проектировщиков, данные конструкции при различных вариантах коммутации электрических контактов обладают несколькими резонансными частотами, достаточно равномерно распределенными в диапазоне 15–200 кГц [12, 13] при приемлемых значениях чувствительностей в режимах как излучения, так и приема. К недостаткам данных стержневых ЭАП следует отнести большие весогабаритные характеристики, сложность конструкции. В качестве иллюстрации вышеописанного упомянем [14], в котором рассмотрены корреляционные лаги Consilium SAL (Speed Automatic Log) со сложными конструкциями цилиндрических антенных блоков из поршневых резонансных ЭАП. Например, TRU R1 (диаметр 0.032 м, высота 0.16 м и масса 3.7 кг) имеет два ЭАП с резонансными частотами 3.84 и 4.196 МГц. Антенный блок TRU (диаметр 0.12 м, высота 0.144 м и масса 23 кг) устроен сложнее: пять ЭАП с резонансной частотой 150 кГц для измерения абсолютной скорости судна в диапазоне регистрируемых глубин 0–250 м (3 излучают, все пять принимают), два ЭАП с резонансной частотой 4 МГц для измерения относительной скорости на сигналах объемной реверберации при минимальной глубине 3 м под килем.

Увеличение количества рабочих УЗ-сигналов для устройств ADCP за счет технологических особенностей изготовления ЭАП предложено в [15].

Табл. 1. Тактико-технические характеристики типовых ЭАП для ADCP [16]

f , кГц	λ , м	d , м	$\theta_{0.7}^\circ$	$A_{БП}$, дБ	α , дБ/м	r , м	W_A , Вт
76.8	0.02	0.28	5	(–36)	0.022–0.028	700	250
153.6	0.01	0.165	4	(–36)	0.039–0.050	400	250
307.2	0.005	0.133	2.2	(–41)	0.062–0.084	120	80
614.4	0.0025	0.1	1.5	(–42)	0.14–0.20	60	30
1228.8	0.0013	0.054	1.4	(–42)	0.44–0.66	25	15

Суть технического решения заключается в использовании необходимого количества импедансных анизотропных согласующих слоев в виде дисковых накладок, обладающих заданными величинами коэффициентов теплового расширения при матрично-волокнутом искусственном заполнении их объемов. Тактико-технические характеристики типовых ЭАП для устройств ADCP представлены в табл. 1 [16].

Проведем анализ записанных в табл. 1 данных. Действительно, приведенные цифры соответствуют известному соотношению для приближенных расчетов угловой ширины основного лепестка ХН $\theta_{0.7}$ на уровне 0.7 (в градусах) для плоского поршневого ЭАП диаметром d в зависимости от его волнового размера d/λ , где $\lambda = c_0/f$ — длина волны и частота f УЗ-сигнала, распространяющегося со скоростью c_0 в водной среде. Как и следовало ожидать (см. правую часть табл. 1), режимы эксплуатации ЭАП различны: каждый ADCP при заданных уровнях как излучаемой акустической мощности W_A , так и коэффициенте затухания α УЗ в морской воде, обеспечивает требуемую дальность действия r . Заявленный уровень бокового поля $A_{\text{БП}}$ от (-36 дБ) до (-42 дБ) указан для областей УЗ-поля (см. [16, фиг. 23]), находящихся за пределами 4-го бокового интерференционного лепестка, т.е. при отклонении точки наблюдения на $\sim \pm 15^\circ$ относительно акустической оси ЭАП. Внутри же телесного сектора ($\sim 30^\circ$), как и положено, есть 1-й, 2-й, 3-й и т.д. боковые лепестки с уровнями -18 дБ (по теории, 13% от основного), -24 дБ (по теории, 6% от основного), -28 дБ (по теории, 4% от основного) и т.д., что может создать в точке приема нежелательную помеху. Уточним, что на практике в устройствах ADCP при реализации измерительных каналов с использованием лучей различной конфигурации — как "Janus", так и "Bugeye" [11] — все равно предполагается применение одинаковых ЭАП, что ограничивает универсальность их применения, например, при облучении снизу вверх с придонной (глубины до 700 м) / приповерхностной (глубины до 25 м) области шельфа. Это напрямую видно из цифр, приведенных в табл. 1. Так, для дальности $r = 700$ м применяются ЭАП с рабочей частотой 76.8 кГц при затухании УЗ около 0.022–0.028 дБ/м и излучаемой акустической мощности $W_A = 250$ Вт, а для дальности $r = 120$ м — ЭАП с рабочей частотой 307.2 кГц

при затухании УЗ около 0.062–0.084 дБ/м и излучаемой акустической мощности $W_A = 80$ Вт.

Отметим, что в процессе проектирования гидроакустической аппаратуры разработчики за счет увеличения энергетического потенциала локатора стараются получить от ЭАП максимально возможную излучаемую мощность. Однако водная среда обладает нелинейностью своих упругих свойств, что приводит к возникновению "новых" спектральных составляющих при распространении интенсивной УЗ-волны с частотой f (самовоздействии) [17], например генерации высших гармонических составляющих с частотами $2f, 3f, \dots, nf$. Оценим с точки зрения линейности и нелинейности режимы работы ЭАП промышленных образцов ADCP, рабочие характеристики которых представлены в [16]. Расчетные данные для анализа сведены в табл. 2, в которой три верхние строчки — для ЭАП устройств ADCP, а четвертая — для ЭАП эхолота "Пескарь" [18] в режиме параметрического излучения (РПИ), что позволит осуществить объективное сопоставление и отметить тенденцию развития.

Взаимовлияние нелинейных и дифракционных эффектов на УЗ-поле ЭАП с пьезоэлементом радиуса a может быть охарактеризовано с помощью параметра Хохлова $N = l_p/l_d$ [19], где $l_p = \rho_0 c_0^3 / \varepsilon \omega_0 p_0$ — расстояние (м) образования разрыва плоской волны с частотой $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ (рад/с) и амплитудой звукового давления p_0 (Па) у поверхности излучателя; ρ_0, c_0 — равновесные значения плотности и скорости звука для воды; $\varepsilon = 3.5$ — нелинейный параметр воды; $l_d = a^2 \omega_0 / 2c_0$, — длина (м) области дифракции Френеля для волны накачки с центральной частотой ω_0 (рад/с). В [19] при численном моделировании процесса распространения звукового пучка в водной среде соотношение нелинейных и дифракционных эффектов, т.е. параметр N , задавалось следующим образом: $N = 2.5$ — нелинейность сравнительно слаба, но достаточна для формирования ударной волны в идеальной среде; $N = 1.6$ — средняя нелинейность и $N = 0.8$ — сильная нелинейность. Из табл. 2 видно, что только для ЭАП с резонансной частотой $f = 76.8$ кГц нелинейностью водной среды можно пренебречь, в то время как для ЭАП с резонансными частотами $f = 153.6$ кГц и $f = 307.2$ кГц нелинейный режим работы практически осуществлен и генерация высших гармоник имеет место (нелинейный эффект самовоздействия).

Табл. 2. Расчетные данные

Ссылка; f , кГц	W_A , Вт	I , Вт/см ²	$\theta_{0.7}^\circ$	l_d , м	d , м	l_p , м	$p_0 \cdot 10^5$, Па	N
[16]; $f = 76.8$	250	0.4	5	3.1	0.28	32.4	0.77	8.18
[16]; $f = 153.6$	250	1.2	4	2.1	0.165	9.6	1.353	3.53
[16]; $f = 307.2$	80	0.6	2.2	2.8	0.133	5.34	0.94	1.91
[18]; $f_0 = 275$; $f_{1,2} = 250, 300$; $F = 50$	70	2.1	5	0.6	0.065	1.2	2.5	2.0

Этот вывод подкрепляют расчетные и экспериментальные значения для ЭАП эхолота "Пескарь" [18] в режиме генерации волны разностной частоты (ВРЧ) $F_- = |f_2 - f_1| = 50$ кГц в водной среде (нижняя строка табл. 2) при излучении сигналов накачки с частотами $f_1, f_2 = 250, 300$ кГц (нелинейный эффект взаимодействия), находящихся в пределах полосы пропускания (~ 60 кГц) этого ЭАП, причем именно это позволяет плавно перестраивать величину ВРЧ и, соответственно, длину ее волны.

Таким образом, из данных, представленных во второй снизу строке табл. 2, можно сделать вывод о том, что ADCP, использующий 4 ЭАП с частотами $f = 307.2$ кГц, можно отнести к системе активной локации, функционирующей в рамках нелинейной акустики, в частности, генерирующей высшие гармонические составляющие с частотами $2f, 3f, \dots, nf$. Проведем анализ расчетно-экспериментальной спектрограммы излучения эхолота "Пескарь" [18], отображающей уровни звуковых

давлений для компонент полигармонического сигнала на акустической оси сформированной параметрической излучающей антенны (ПИА) для дистанции 10 м (рис. 1).

Видно, что нелинейное взаимодействие сигналов накачки с частотами $f_1, f_2 = 250, 300$ кГц позволило расширить частотный диапазон излучения не только вниз, но и вверх, например, при использовании третьих гармоник до 900 кГц, что практически перекрывает диапазон рабочих частот всех пяти ЭАП для ADCP из табл. 1.

Морская поверхность является подвижной и неровной границей раздела, переизлучаемое ею УЗ-поле состоит из двух компонент — регулярной, сформированной вблизи зеркального направления, и случайной, образующей рассеянное поле в нижней полусфере, причем соотношение регулярной и случайной компонент переизлученного поля определяется соразмерностью длины волны λ УЗ и расстояния h от "вершин" и "подошв" бегущей поверхностной волны [20]. Указанная выше особенность широкополосного излучения "бестелесной" ПИА, в частности на "длинноволновой" ВРЧ-

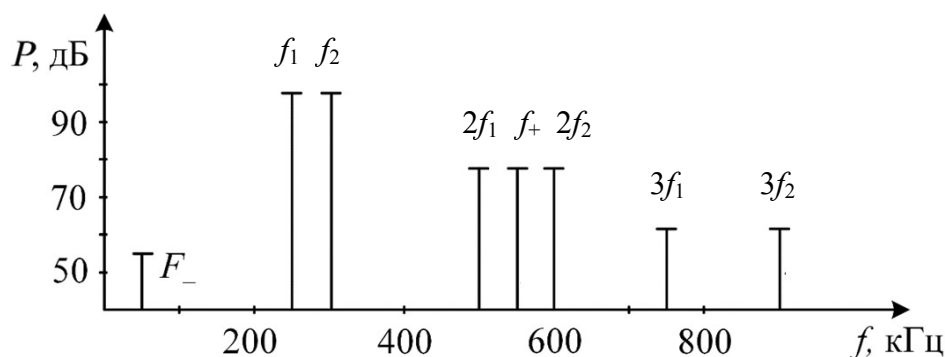


Рис. 1. Расчетно-экспериментальная спектрограмма излучения эхолота "Пескарь"

спектральной компоненте, позволяет сделать предположение о том, что использование в устройствах ADCP эффектов нелинейной акустики может быть перспективным.

ВЫБОР МОДЕЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ АНТЕННЫ И СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Умение практического применения высокоинтенсивных УЗ-волн, т.е. нелинейных эффектов, важно для разработки современных приложений в системах интроскопии, медицинской диагностики, подводной акустики и т.д. В семидесятых годах прошлого века в Таганроге [21] основной темой нелинейной акустики в интересах как гражданского, так и военного приложений явились исследования ПИА, обусловленные особенностями УЗ-поля ВРЧ — постоянно-высокая направленность основного лепестка без бокового поля в значительной полосе частот при небольших весо-габаритных характеристиках ЭАП. Так, в метрологии большое внимание уделялось уменьшению габаритов аппаратуры, повышению ее производительности, а также проектированию средств измерений, обладающих излучающим трактом с малоизменяющимися в широкой полосе частот акустическими параметрами [22]. В этой связи проводились работы по разработке измерительных широкополосных ПИА вместе с комплектом радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) типов НАП (нелинейный акустический преобразователь), НАИ (нелинейный акустический излучатель) как стандартных излучателей для измерения характеристик гидроакустических антенн и образцовых гидрофонов в бассейнах заводских испытательных лабораторий [21]. Условия пространственной ограниченности измерительных бассейнов и определили ряд требований как к РЭА, так и к ЭАП для ПИА в режиме генерации ВРЧ. Это в целом соответствует и условиям нашего планируемого эксперимента, в котором необходимо сформировать УЗ-излучение в малом и постоянном по величине телесном угле для большого диапазона длин волн ВРЧ $\Lambda = c_0 / |f_2 - f_1|$ при использовании ЭАП с высокочастотной накачкой f_1, f_2 и небольшими по величинам длинами как ближней зоны l_d , м, так и зоны взаимодействия l_3 , м.

Проанализируем технические характеристики некоторых из них — НАП (3, 4) и НАИ (5, 6, 8, 9), перечисленные в [21, таблица 2].

Диапазон частот / длин волн ВРЧ, кГц / м, — от 0.3 / 5 до 300 / 0.005;

угловая ширина основного лепестка ХН в диапазоне частот — от $(1.5 \pm 0.5)^\circ$ до $(5.0 \pm 0.5)^\circ$;

для перекрытия диапазона ВРЧ применялись до двух ЭАП с плоскими/слабоискривленными пьезоэлементами диаметров от 20 до 50 мм с резонансными частотами от 0.5 МГц до 4.75 МГц;

длины ближней зоны, м, — от 0.04 до 0.65;

зона сферического распространения, м, — от 0.3 до 3;

длина зоны взаимодействия, м, — от 0.8 до 15;

непрерывный/импульсный режим работы;

длительность импульса, мс, — 0.06–12.0;

частота следования импульсов, Гц, — 0.5–400.0.

Отметим, данные устройства обеспечивали небольшой, но стабильный уровень звукового давления — около 10 Па на дистанции 3 м для ВРЧ 10 кГц / 0.15 м, что входило в требуемые параметры технических заданий и решало проблему разработки новых компактных образцовых средств измерений, позволяющих проводить лабораторную градуировку, близкую к условиям свободного поля.

Схема измерительной установки для исследования пространственных характеристик ПИА, объединяющая спектральный метод, основанный на выделении гармонических составляющих сформировавшегося полигармонического сигнала, и наблюдение формы многокомпонентной волны, представлена на рис. 2. РЭА-элементы измерительной установки структурированы по трактам излучения, приема, наиболее подробно выделен акустический тракт. Рассмотрим последовательно функционирование установки. Электрический сигнал биений частот накачки f_1, f_2 с блока формирования 1 (генераторы сигналов специальной формы АК ИП ГСС-05, GW Instek MFG-72120MA, сумматор, режекторные фильтры для подавления на 40–50 дБ комбинационных сигналов, образующихся в электронном тракте) подается через усилитель мощности 2 (FRANKONIA VLC-220) на ЭАП 4. С дополнительных выходов блоков 1 и 2 осуществляется синхронизация функционирования блоков в трактах излучения и приема. С помощью осциллографа 3 (GW Instek GOS-6103C) осуществляется контроль параметров электрического сигнала, поступающего на ЭАП 4, который на поворотно-выдвижном устройстве (ПВУ) 7 установлен в заданной части бассейна 5 (длина 6 м, ширина 3 м, глубина 2 м). Его внутренние поверхности снабжены поглощающим покрытием 6.

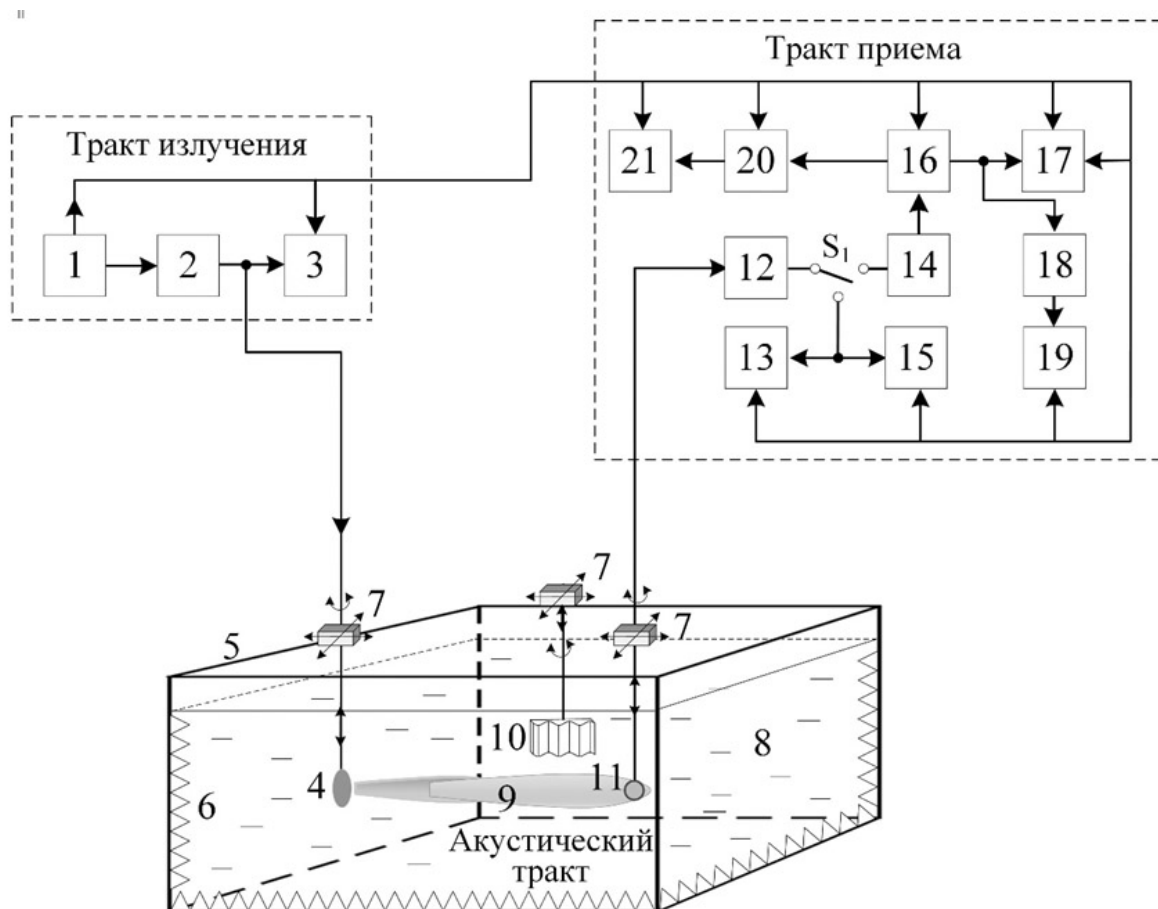


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки.

1 — блок формирования сигнала; 2 — усилитель мощности сигнала; 3 — осциллограф; 4 — ЭАП; 5 — бассейн; 6 — внутреннее поглощающее покрытие; 7 — поворотное-выдвижное устройство; 8 — пресная вода; 9 — сформированная ПИА; 10 — пластина-отражатель; 11 — гидрофон; 12 — согласующий каскад; 13 — осциллограф; 14 — перестраиваемый резонансный усилитель; 15 — анализатор спектра; 16 — стробирующее устройство; 17 — осциллограф; 18 — детектор; 19 — самописец уровня; 20 — АЦП; 21 — компьютер

Бассейн 5 заполнен пресной водой 8, что и образует акустический тракт установки, основным элементом которого является сформированная ПИА 9, расположенная в средней части водного объема бассейна 5. К акустическому тракту можно отнести и акустически мягкую пенопластовую пластину-отражатель 10 с синусоидальным профилем неровностей на одной из граней, которая размещена на той же глубине с помощью своего ПВУ 7 вблизи одной заглушенной стенки бассейна 5 (рис. 2) и будет облучаться УЗ-сигналами в планируемом модельном эксперименте.

Отметим, что целью данной работы является оценка перспектив применения для измерения характеристик морского волнения гидроакустических систем с использованием режима параметри-

ческого излучения. В этой связи в качестве упрощенной модели взволнованной, но статичной в данный момент времени морской поверхности с заданными параметрами волнения использовалась акустически мягкая пенопластовая пластина-отражатель 10 с синусоидальным профилем неровностей на одной из граней. Пенопласт для моделирования акустически мягкой границы можно использовать, т.к. акустическое сопротивление пенопласта $0.048 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с} \ll$ акустического сопротивления воды $15 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$, что определяет условие противофазности падающих и отраженных УЗ-волн.

При расчете периодичности распределения неровностей на пластинах-отражателях 10 был использован принцип масштабирования. Так, если

в натуральных условиях шельфа при облучении с глубины 100 м в пятно засветки размером 15 м попадает три элемента поверхностного волнения длиной волны 5 м и размахом 1 м каждый, то для лабораторного эксперимента — дистанция ~ 1 м и пятно уменьшается до 0.15 м, на котором размещены те же три элемента с длиной волны по 0.05 м и размахом 0.01 м. Исходя из этих соображений, для проведения экспериментов были выбраны следующие пространственные характеристики синусоидального профиля неровностей пластин-отражателей 10: расстояние между максимумами (минимумами) на отражающей поверхности $\lambda_{\text{пов}} = 0.03, 0.05, 0.06$ м при размахе (двойная амплитуда) $h = 0.002, 0.005, 0.010, 0.015, 0.02$ м, что при обратном пересчете для шельфа будет составлять — длины волн поверхностного волнения 3, 5, 6 м при двойной амплитуде 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 м.

Исходя из представленного выше анализа для формирования ПИА, использовался один из вариантов ЭАП, который был разработан для НАИ-9: форма пьезоэлемента — плоский диск диаметром $d = 21$ мм, закрепленный по периметру за счет клейки в герметичный корпус; резонансная частота $f_0 = 2.12$ МГц, длина волны $\lambda_0 = c_0 / f_0 = 0.708$ мм, где c_0 — скорость звука в воде (1500 м/с); расчетное значение длины ближней зоны (области дифракции Френеля) $l_d = 0.45$ м. Значения частот f_1, f_2 выбирались из расчета уменьшения (увеличения) величин относительно f_0 , например, для ВРЧ $F_- = |f_2 - f_1| = 100$ кГц частоты для волн накачки равны $f_1 = (2120 - 50)$ кГц, $f_2 = (2120 + 50)$ кГц. Таким образом, в акустическом тракте измерительной установки можно было осуществлять изменение ВРЧ в диапазоне длин волн Λ , мм / частот F_- , кГц:

$$\Lambda = 21.4 \text{ мм} / F_- = 70 \text{ кГц};$$

$$\Lambda = 15 \text{ мм} / F_- = 100 \text{ кГц};$$

$$\Lambda = 10 \text{ мм} / F_- = 150 \text{ кГц};$$

$$\Lambda = 7.5 \text{ мм} / F_- = 200 \text{ кГц}.$$

Тракт излучения позволял изменять длительность импульса излучения в диапазоне: $\tau_{\text{имп}} = 0.06 \div 0.1$ мс и, соответственно, пространственную протяженность посылки в воде $l_{\text{имп}} = 0.09 \div 0.15$ м. Расчетное значение угловой ширины $\Theta_{0.7}$ по уровню 0.7 для УЗ-пучка накачки с резонансной частотой f_0 составило $\Theta_{0.7} = 60 \lambda / d = 2.023^\circ$. Если округлить величину ширины пучка до $\sim 3^\circ$, то при нормальном облучении с дистанций 1 м / 2 м / 3 м размер пятна на поверхности пластины-отражателя 10 с синусоидальным профилем неровностей составлял

около 5 см / 10 см / 16 см. В этой связи размеры пластины-отражателя 10 с синусоидальным профилем неровностей были выбраны 20×30 см, причем моделируемый синусоидальный профиль "остановленной" поверхностной волны выполнен вдоль более длинной стороны, а ее волновые фронты — параллельны более короткой стороне.

Как следует из рис. 2, результирующее полигармоническое УЗ-поле ПИА (выделенная серым пространственная область 9 на акустической оси ЭАП) регистрировалось гидрофоном 11 (Bruel & Kjaer 8103 с рабочим диапазоном частот от 4 кГц до 200 кГц), с выхода которого электрический сигнал через согласующий каскад 12 поступал на вход перестраиваемого резонансного усилителя 14 (селективные микровольтметры В6-1 или В6-2). С выхода перестраиваемого резонансного усилителя 14 снимается электрический сигнал, пропорциональный амплитуде выделяемой спектральной компоненты, который поступает на вход осциллографа 13 (GW Instek GOS-6103С), развертка которого запускается синхроимпульсом от блока формирования 1. Кроме этого, измерительная установка позволяет в широкой полосе частот оценить амплитудные соотношения компонент полигармонического электрического сигнала за счет подключения анализатора спектра 15 (С 4-25). Экспериментальные измерения пространственных характеристик УЗ-полей спектральных составляющих, генерируемых ПИА 9 в водной среде 8, проводятся в импульсном режиме с использованием стробирующего устройства 16, что позволяет выделить во времени именно информационный сигнал, убрав маскирующие помехи. Параметры выделенного сигнала измеряются с помощью осциллографа 17 (GW Instek GOS-6103С), а также могут после детектора 18 регистрироваться с помощью самописца уровня 19 (Bruel & Kjaer 2307), причем через АЦП 20 (модуль E20-10) полученная информация поступает на ЭВМ 21 (ПО "PowerGraph 3.3 Professional").

Описанные в [21, 23] структурные схемы испытательных стендов отличаются от рассмотренной выше тем, что в акустическом тракте ПИА используются пластины, образующие как отдельные резонансные акустические фильтры, так и системы поглощающих слоев различной формы и размеров. Эти элементы, моделирующие совокупность границ раздела различных сред, располагали на акустической оси ЭАП в области нелинейного взаимодействия высокочастотных волн накачки для ее как ограничения, так и изменения формы. Отметим, что в цели описываемого эксперимента искусственное ограничение области взаимодействия не входит, наоборот, предполагается естественное формирование ПИА в гидроакустическом канале, что соответствует режиму измерения ха-

рактических характеристик морского волнения гидроакустическими системами с использованием РПИ на шельфе при зондировании со стороны дна. В нашем эксперименте пластина-отражатель 10 с синусоидальным профилем неровностей моделирует взволнованную границу раздела вода-воздух, т.е. "остановленную" поверхностную волну, которая, рассеивая определенным образом ВРЧ, может позволить при обработке получить информацию о поверхностном волнении.

В [24, 25] изложены и обобщены результаты разработок ПИА с относительно низкочастотными и высокоинтенсивными волнами накачки, которые использовались в гидроакустических системах дальней локации, в частности, рассмотрены характеристики ВРЧ в слоистых средах и при наличии границ раздела в протяженной области взаимодействия. Так, если граница раздела попадает в область взаимодействия ПИА, то, помимо искажения ее конфигурации, появляется часть пространства, где взаимодействуют не только падающие, но и отраженные волны, что влияет на пространственные характеристики результирующего поля излучения ВРЧ. Это может осложнить, например, обнаружение малоразмерных объектов, находящихся на дне или погруженных в донный грунт, которое осуществляется на фоне сложной помеховой обстановки при зондировании сверху вниз с надводного судна или подводного буксируемого носителя ПИА [24].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

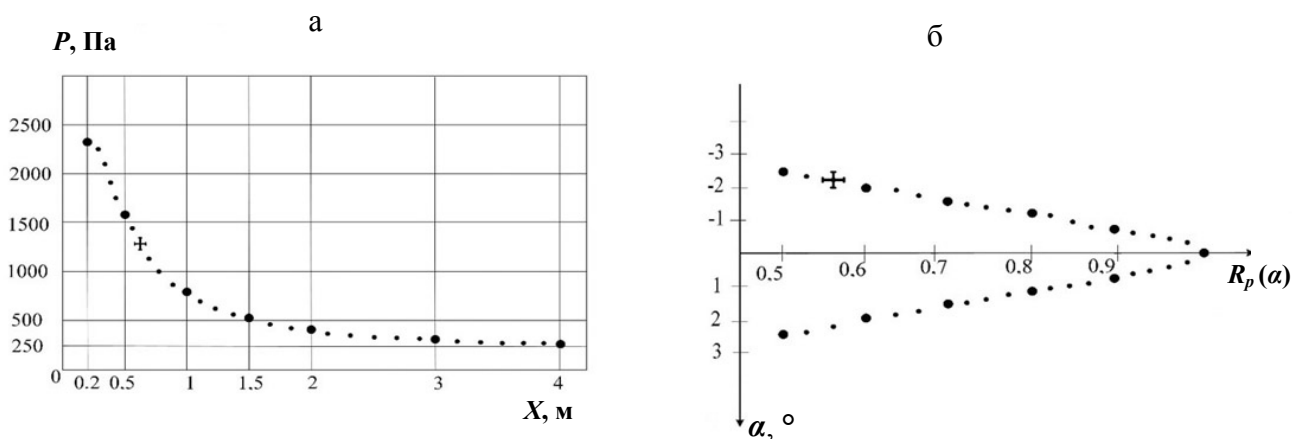


Рис. 3. Экспериментальные осевое (а) и угловое нормированное (б) распределения амплитуд звукового давления для ПИА, генерирующей в водной среде УЗ-сигнал ВРЧ $F_- = |f_2 - f_1| = 150$ кГц

Калибровка ПИА как средства измерения

Для оценки основных характеристик ПИА 9 как предполагаемого средства измерения, обладающего излучающим трактом с малоизменяющимися в широкой полосе частот акустическими параметрами, были проведены серии измерений пространственных распределений амплитуд звукового давления ВРЧ в указанном выше диапазоне. Для этого ЭАП 4 и гидрофон 11 были установлены в средней части водного объема 8 измерительного бассейна 5 при четырехметровом удалении друг от друга. Тонкая окончательная юстировка их взаимного размещения на горизонтальной акустической оси ЭАП 4 достигалась перемещением "вверх-вниз" и "влево-вправо" гидрофона 11, результатом чего являлось получение максимального уровня сигнала по накачке на экране осциллографа 13.

Типичные результаты для ПИА, генерирующей в водной среде 8 УЗ-сигнал ВРЧ $F_- = |f_2 - f_1| = 150$ кГц, представлены на рис. 3.

В результате измерений было установлено:

1) Из рис. 3 следует, что максимум звукового давления ВРЧ находится приблизительно на расстоянии 0,2 м, которое является границей ближней зоны ЭАП 4 для волн накачки. Ранее была рассчитана величина ближней зоны 0,45 м, уменьшение ее длины обусловлено условиями закрепления

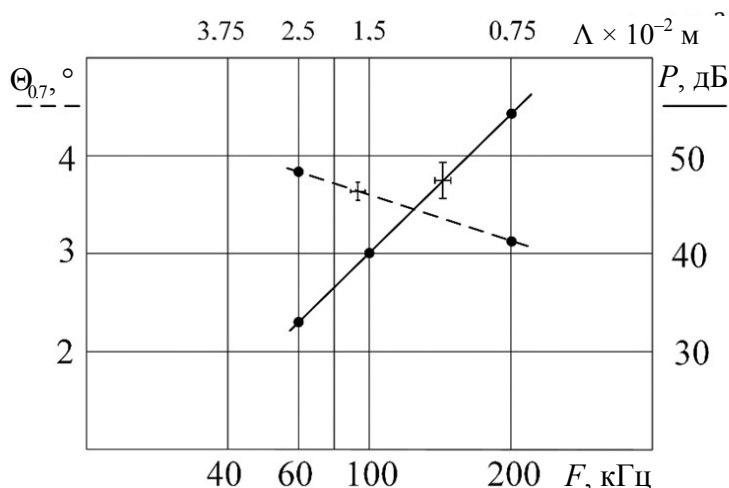


Рис. 4. Объединенные зависимости ПИА как средства измерения в водной среде. - - - угловая ширина основного лепестка ХН (левая вертикальная ось $\Theta_{0.7}, ^\circ$); — амплитуда звукового давления ВРЧ (правая вертикальная ось P , дБ, относительно 1 Па, приведенная к расстоянию 1 м). Графики даны для диапазона частот (кГц) / длин волн (м) ВРЧ (нижняя/верхняя горизонтальная ось соответственно)

пьезоэлемента в корпусе ЭАП 4. Начиная с расстояния 1 м, амплитуда звукового давления ВРЧ плавно убывает по закону сферического распространения, сигнал ВРЧ сформирован и может быть использован для измерений, т.е. облучения пластины-отражателя 10.

2) Ширина пучка на ВРЧ соответствует расчетному значению в ХН по давлению $R_p(\alpha)$, на ВРЧ отсутствуют боковые лепестки, угловая ширина основного лепестка ХН составляет для $F_0 = 150$ кГц $\sim 3^\circ$, что также соответствует условиям проведения исследований по облучению пластины-отражателя 10.

3) Из рис. 4 видно, что для диапазона от 50 кГц (30 мм) до 200 кГц (7.5 мм) угловая ширина основного лепестка ХН ПИА на ВРЧ практически постоянна; эффективность процесса нелинейного взаимодействия, т.е. уровень генерируемой амплитуды звукового давления ВРЧ с ростом значения F_0 увеличивается.

Как отмечалось выше, расчетное взаимовлияние нелинейных и дифракционных эффектов на УЗ-поле накачки ЭАП 4 можно оценить с помощью параметра Хохлова $N = l_p / l_d$, величина которого составила ~ 2.4 ; т.е. нелинейность сравнительно слаба. Расчетные значения $p_{01,02}$ амплитуд звукового давления сигналов накачки у поверхности ЭАП 4 составляли около $0.075 \cdot 10^5$ Па для каждого. Теоретическое значение длины области взаимодействия сигналов накачки сопоставимо с максимальным размером водного объема бассейна и составляло около 5 м, определяясь как их частотой, так и свойствами водной среды распространения. Отметим, что представленные данные в целом следуют известным результатам, опубликованным в [21]. Таким образом, акустический тракт обладает необходимыми качествами,

это: широкополосность зондирующего сигнала и постоянство площади облучения на модельной границе раздела, а также минимальность маскирующего влияния реверберации при измерениях в бассейне ограниченного объема, — что позволяет сделать вывод о возможности использования ПИА для проведения модельного эксперимента по изучению рассеяния УЗ на границе раздела с синусоидальным профилем неровностей.

Рассеяние пластиной-отражателем УЗ-поля ВРЧ, сформированного ПИА

В настоящее время модель и теория ПИА развита для условий эхопоиска объектов вблизи гладкой границы раздела вода-воздух [24, 25] с использованием метода мнимого источника. Его суть — влияние плоской границы раздела вода-воздух на рассеяние УЗ заменяют воздействием мнимого источника волн накачки с близкими частотами f_1, f_2 , т.е. мнимой ПИА, фиксированное положение которой в воздушной среде определяют из законов геометрической оптики. Отраженные акустически мягкой невзволнованной границей вода-воздух волны накачки имеют дополнительный фазовый сдвиг на π радиан, в связи с чем считается, что мнимая ПИА генерирует в водной среде "противофазную" ВРЧ относительно ранее сформированного реальной ПИА (до отражения) сигнала. Исходя из этого, формирование ПИА "результатирующего" сигнала ВРЧ при отражении от гладкой свободной поверхности представляют как результат наложения сигналов ВРЧ от двух ПИА, имеющих общую акустическую ось в водной среде, но излучающих противофазные волны накачки. Первую ПИА с ограниченной зоной взаимодействия образует ЭАП 4 и участок водной среды до гладкой отражающей границы. Вторая

ПИА представляет собой излучатель в виде участка гладкой границы раздела, отразившего волны накачки, и область воды, в которой далее распространяется пучок. Суперпозиция двух ПИА и образует УЗ-поле, в котором наблюдаются искажения плавности изменения амплитуды звукового давления ВРЧ как вдоль, так и поперек пучка: например, после отражения в поперечном распределении на акустической оси образуется минимум, величина которого увеличивается при удалении от границы раздела [24, 25].

В нашем случае граница раздела вода-воздух возмущена, поверхностная волна распространяется в направлении генерального бега со скоростью V , в результате чего в области облучения наклон профиля поверхностной волны относительно нормали периодически меняется. Это приводит к периодическому смещению вверх и вниз мнимой "воздушной" ПИА по нормали, которая ее соединяет с "подводной" ПИА. Это изменит процесс формирования результирующего УЗ-поля ВРЧ, в частности, за счет перемещения акустической оси мнимой "воздушной" ПИА "в такт" со смещением ее в вертикальной плоскости относительно неподвижной акустической оси "подводной" ПИА. Таким образом, взволнованная поверхность в те-

чение периодов колебаний "перераспределяет" УЗ-энергию отраженной противофазной ВРЧ в пределах некоторого углового сектора, что может снизить степень искажения амплитудных характеристик результирующего сигнала в гидроакустическом канале. Непосредственные экспериментальные измерения таких "динамично-изменяющихся" параметров УЗ-полей представляют определенные сложности, например, за счет необходимости применения трехмерных решеток из малоразмерных и однотипных гидрофонов. В этой связи целесообразным при проведении экспериментов является осуществление физического моделирования рассеяния УЗ-полей ВРЧ при различных значениях углов скольжения на статичной во времени и акустически мягкой пенопластовой пластине-отражателе с синусоидальным профилем неровностей.

Схематично геометрия эксперимента представлена на рис. 5. На рис. 5, а:

– волнистая линия в середине рисунка — синусоидальный профиль облучаемой грани пластины-отражателя 10 с длиной поверхностной волны $\lambda_{\text{пов}}$ и высотой неровностей h (вверху — штриховка пенопласта 10, внизу — штриховка воды 8);

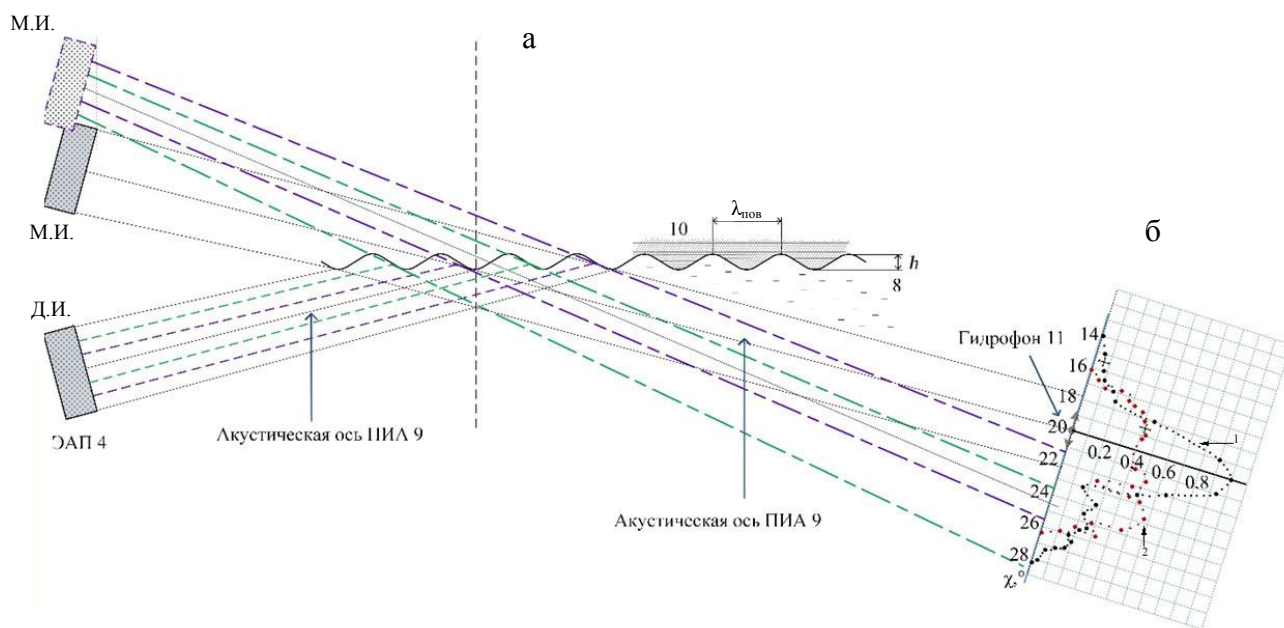


Рис. 5. Геометрия эксперимента по рис. 2, вид сверху (а), экспериментальные нормированные распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ для двух моделей неровностей (б).

На графиках (б): 1 — график для модели малых неровностей $h/\lambda = 2 \text{ мм} / 10.7 \text{ мм} = 0.19$, $F_- = 140 \text{ кГц}$; 2 — график для модели больших неровностей $h/\lambda = 20 \text{ мм} / 7.5 \text{ мм} = 2.7$, $F_- = 200 \text{ кГц}$; χ — угол скольжения, $\chi_0 = 20^\circ$ — угол облучения, М.И. — мнимый источник, Д.И. — действительный источник

$\lambda_{\text{пов}} = 0.05$ м при размахе (двойная амплитуда) $h = 2$ мм и $h = 20$ мм (рис. 5). Если учесть, что акустический тракт измерительной установки позволял осуществлять изменение ВРЧ в диапазоне длин волн Λ от $\Lambda = 21.4$ мм до $\Lambda = 7.5$ мм, очевидно, что при небольших углах скольжения χ (до 30°) можно реализовать различные варианты облучения пластин-отражателей 10, попадающих в рамки моделей как малых (первый вариант), так и больших неровностей (второй вариант).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Пенопластовая пластина-отражатель 10 с синусоидальным профилем неровностей на рабочей поверхности (рис. 2) расположена в гидроакустическом бассейне 5 в водной среде 8 и облучается ВРЧ от ПИА 9 под углом скольжения χ_0 . Пластина закреплена в держателе, погружена в воду и находится в вертикальном положении за счет прикрепленных снизу грузов, имеет возможность фиксированного поворота относительно вертикальной оси с помощью ПВУ 7, находится на расстоянии около 1.4 м по акустической оси ПИА 9.

Следует отметить, что представленные на рис. 5, б, и рис. 7 экспериментальные результаты являются типичными в проведенных сериях, причем удобство их последующего сопоставительного анализа обусловлено использованием в измерениях одинаковой величины какого-либо параметра, например, угла облучения $\chi_0 = 20^\circ$, но двух различных ВРЧ $F_- = 140$ кГц и 200 кГц

(рис. 5, б) или ВРЧ $F_- = 180$ кГц, но двух различных величин угла облучения $\chi_0 = 30^\circ$ и 16° (рис. 7).

Итак, из рис. 5, б, следует по графику 1 для модели малых неровностей ($h/\Lambda = 2 \text{ мм} / 10.7 \text{ мм} = 0.19$; $F_- = 140$ кГц):

1) форма и угловая ширина основного лепестка ПИА 9 практически не изменились, направление основного лепестка на ВРЧ при отражении ($\sim 20^\circ$) подчиняется закономерности геометрической акустики, т.е. используемую модель малых неровностей можно считать акустически ровной и отражающей зеркально;

2) в секторе $\sim 22^\circ \div 28^\circ$ (направление акустической оси мнимой "противофазной" ПИА около 24°) наблюдается формирующаяся интерференционная картина для ВРЧ при средней нормированной амплитуде около 0.2;

3) "противофазность/сфазированность" данного сигнала ВРЧ относительно зеркально отраженной ВРЧ не установлена, т.к. в водной среде акустические оси обеих ПИА разнесены ($\sim 4^\circ$) в пространстве, однако можно отметить, что для направления $\sim 23^\circ$ наблюдается искажение известной зависимости динамики спада амплитуды ВРЧ для внеосевых направлений.

Из рис. 5, б, следует по графику 2 для модели больших неровностей ($h/\Lambda = 20 \text{ мм} / 7.5 \text{ мм} = 2.7$, $F_- = 200$ кГц):

1) основной лепесток ПИА 9 существенно изменен в результате рассеяния, в частности, изменились его амплитуда, форма и угловая ширина,

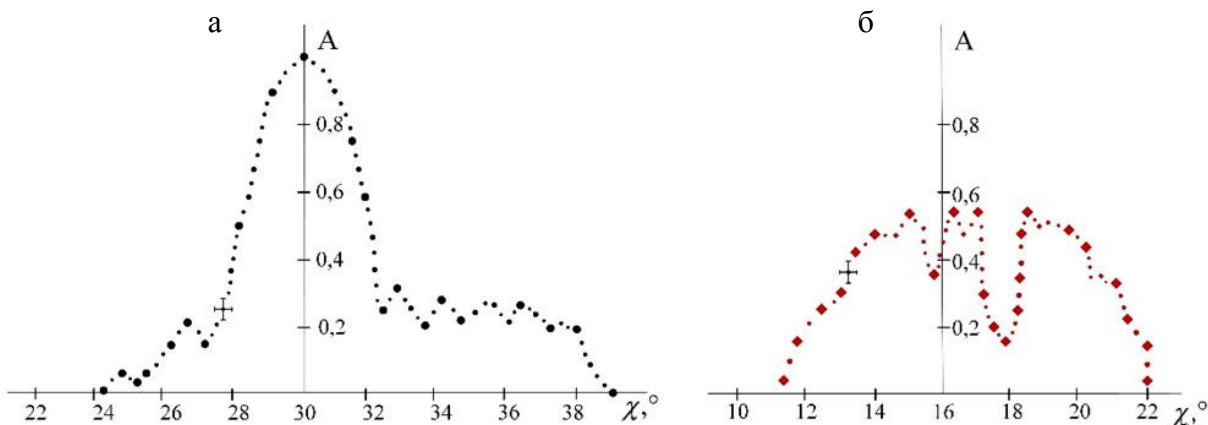


Рис. 7. Экспериментальные нормированные распределения амплитуд звуковых давлений ВРЧ для двух моделей неровностей при $F_- = 180$ кГц.

а — модель малых неровностей: $h/\Lambda = 2 \text{ мм} / 8.3 \text{ мм} = 0.23$, $\chi_0 = 30^\circ$;
 б — модель больших неровностей: $h/\Lambda = 20 \text{ мм} / 8.3 \text{ мм} = 2.4$, $\chi_0 = 16^\circ$

что можно объяснить расфазировкой ВРЧ от реальной "подводной" ПИА 9, т.е. используемую модель больших неровностей нельзя считать акустически ровной и отражающей зеркально;

2) в секторе $\sim 16^\circ \div 26^\circ$ (направление акустической оси мнимой "противофазной" ПИА около 24°) наблюдается интерференционная картина для ВРЧ при средней нормированной амплитуде около 0.5, в которой происходят значительные флюктуации;

3) можно предположить, что в водной среде акустические оси обеих ПИА разнесены в пространстве ($\sim 5^\circ$), причем видно, что при рассеянии УЗ данной моделью взаимное влияние "разнофазных" ВРЧ от обеих ПИА приводит к разрушению ПИА как самого инструмента исследования.

Из рис. 7, а, следует для модели малых неровностей ($h/\lambda = 2\text{ мм} / 8.3\text{ мм} = 0.23$, $F_- = 180\text{ кГц}$, угол облучения $\chi_0 = 30^\circ$):

1) форма и угловая ширина основного лепестка ПИА 9 не изменились, направление основного лепестка на ВРЧ при отражении ($\sim 30^\circ$) подчиняется закономерности геометрической акустики, т.е. используемую модель малых неровностей можно считать акустически ровной и отражающей зеркально;

2) в секторе $\sim 32^\circ \div 38^\circ$ (направление акустической оси мнимой "противофазной" ПИА около 35°) наблюдается формирование интерференционной картины для ВРЧ при средней нормированной амплитуде около 0.2;

3) "противофазность/сфазированность" данного сигнала ВРЧ относительно зеркально отраженной ВРЧ не установлена, т.к. в водной среде акустические оси обеих ПИА разнесены в пространстве, однако можно отметить, что для направления $\sim 32^\circ$ наблюдается искажение известной зависимости динамики спада амплитуды ВРЧ для внеосевых направлений.

Из рис. 7, б, следует для модели больших неровностей ($h/\lambda = 20\text{ мм} / 8.3\text{ мм} = 2.4$, $F_- = 180\text{ кГц}$, угол облучения $\chi_0 = 16^\circ$):

1) основной лепесток ПИА 9 существенно изменен в результате рассеяния, в частности, изменились его амплитуда, форма и угловая ширина, что можно объяснить расфазировкой ВРЧ от реальной "подводной" ПИА 9, т.е. используемую модель больших неровностей нельзя считать акустически ровной и отражающей зеркально;

2) в секторе $\sim 12^\circ \div 22^\circ$ (направление акустической оси мнимой "противофазной" ПИА около 19°) наблюдается интерференционная картина для ВРЧ при средней нормированной амплитуде около 0.6, в которой имеются значительные флюктуации;

3) можно предположить, что в водной среде акустические оси обеих ПИА разнесены в пространстве ($\sim 5^\circ$), причем видно, что при рассеянии УЗ данной моделью взаимное влияние "разнофазных" ВРЧ от обеих ПИА приводит к разрушению ПИА как самого инструмента исследования.

Важно отметить, что при прочих равных условиях осуществления эксперимента применение модельной поверхности с большими размерами неровностей (20 мм) привело к "расфазировке" переотраженного УЗ-сигнала ВРЧ, который до отражения был сформирован (рис. 5, 7) ПИА. Таким образом, и для ВРЧ, генерируемой ПИА, справедлив вывод из [20]: переизлучаемое модельной поверхностью УЗ-поле состоит из двух компонент — регулярной, сформированной вблизи зеркального направления, и случайной, образующей рассеянное поле в нижней полусфере, причем их соотношение определяется соразмерностью длины волны УЗ и высоты h бегущей поверхностной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет предложить новый способ измерения параметров взволнованной морской поверхности, например, для режима широкополосного бистатистического облучения (излучатель и приемник разнесены в пространстве) УЗ-сигналами со стороны дна. Наиболее наглядно суть предложения можно увидеть из анализа рис. 5. Очевидно, что представленные на рис. 5 поперечные нормированные распределения имеют наглядные отличия друг от друга, причем если в эксперименте для модели больших неровностей использовать широкополосность излучения ПИА 9 и перестроить излучение ВРЧ на $F_- = 20.25\text{ кГц}$, $\Lambda = 74.07\text{ мм}$, то эксперимент можно перевести в режим модели малых неровностей. Данный прием — возможность подстройки длины волны зондирующего сигнала под характеристики имеющегося морского волнения при наличии регистрации пространственного распределения рассеянного УЗ-поля — дает основание предположить применимость гидроакустических систем с использованием режима параметрического излучения для изучения параметров взволнованной поверхности, в частности, косвенной оценки размеров неровностей h на ней. Следует отметить, что в [31] представлен анализ применения гидроакустических систем активной локации с приемоизлучающими антенными устройствами оригинальной конструкции, которые можно размещать на дне мелководной акватории и использовать как для излучения, так и регистрации распределения рассеянного поля ВРЧ,

т.е. для получения информации о гидроусловиях в соответствии с предложенным способом. Недостатком ПИА с бигармонической накачкой является снижение эффективности генерации ВРЧ (рис. 4) при переходе в длинноволновый диапазон, соответствующий значениям параметров реального развитого морского волнения, однако в [32] рассмотрена возможность изменения эксплуатационных характеристик ПИА с многокомпонентным сигналом накачки, в частности, для повышения энергетического потенциала на формирующихся низкочастотных сигналах кратных частот при неизменной ширине основного лепестка характеристики направленности (ХН).

Тематика исследований, описанных в данной статье, является продолжением работ [27–32], 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.

Благодарность

Автор благодарит к.т.н., доцента кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ Волощенко Александра Петровича за инициативную помощь в постановке и проведении эксперимента, консультации по измерениям и анализу данных рассеяния.

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> (дата обращения 10.03.2024).
2. Воловов В.И., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П. Акустический способ определения высоты морских волн. Патент СССР N 412578 A1. 25.01.1974. URL: <https://patentdb.ru/patent/412578>
3. Молебный В.В. Измеритель направления морских волн. Патент СССР SU419826 A1. 15.03.1974. URL: <https://patents.su/2-419826-izmeritel-napravleniya-morskikh-voln.html>
4. Балакин Р.А., Тимец В.М. Гидроакустический автономный волнограф. Патент РФ RU2011132211 A. 10.02.2011. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2011132211A/ru>
5. Греков А.Н., Васильев Д.М., Котов М.Н. Акустический измеритель параметров волн // Системы контроля окружающей среды. Севастополь, 2006. С. 51–56. URL: <https://msoe.ru/articles/2006/09-05/>
6. Богородский В.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 263 с.
7. Fissel D.B., Birch J.R., Borg K., Melling H. Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application // Proc. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3–6 May 1999. DOI: 10.4043/10794-MS
8. Strong B.S. System and method for determining wave characteristics from a moving platform. Патент США US 2010302908 A1. 02.12.2010.
9. Deines A. Broadband acoustic doppler current profiler. Патент США US 5615173. 25.03.1997.
10. System and method for measuring wave directional spectrum and wave height. Патент США US 6282151 B1. Rowe-Deines Instruments Incorporated. 28.08.2001.
11. Terray E.A., Brumley B.H., Strong B. Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP // Proc. of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement, 1999. P. 66–71. DOI: 10.1109/CCM.1999.755216
12. Keisuke A. Multifrequency ultrasonic transducer. Патент США US 4490640. 25.12.1984.
13. Transducer. Патент США US 4209766 A. 24.06.1980.
14. Акустический лаг Consilium SAL R1a. (Электронный ресурс). URL: https://zora.ru/?page_id=319 (дата обращения 10.03.2024г.).
15. Broadband acoustic transducer. Патент США US 5343443 A. 30.08.1994.
16. Teledyne RD Instruments. (Электронный ресурс). URL: <https://datchiki.com/manufacturers/teledyne-rd-instruments-flagman-gidrologii/>
17. Мюир Т.Дж. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков // Акустика морских осадков / Пер. с англ.; под ред. Ю.Ю. Житковского. М.: Мир, 1977. С. 227–273.
18. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. Л.: Судостроение, 1986. 272 с.
19. Бахвалов Н.С., Жилейкин Н.М., Заболотская Е.А. Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 176 с.
20. Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика и рыболокация. М.: Пищ. пром-сть, 1978. 312 с.
21. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
22. Блинова Л.П., Колесников А.Е., Ланганс Л.Б. Акустические измерения. М.: Изд-во стандартов, 1971. 271 с.
23. Заграй Н.П. Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 433 с.
24. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов н/Д: Ростиздат, 2004. 400 с.
25. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
26. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
27. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П., Волощенко Е.В. Акустический волнограф. Патент РФ RU168083 U1. 17.01.2017. URL: <https://patents.google.com/patent/RU168083U1/ru>

28. Волощенко Е.В., Тарасов С.П. и др. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения. Патент РФ RU2721307 C1. 18.05.2020. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2721307C1/ru>
29. 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
30. Волощенко Е.В., Волощенко В.Ю. Многочастотный доплеровский способ измерений скорости течений в водной среде. Патент РФ RU2795579 C1. 05.05.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru>
31. 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>
32. 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>

Южный федеральный университет, г. Таганрог

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

Материал поступил в редакцию 22.04.2024

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF HYDROACOUSTIC SYSTEMS USING PARAMETRIC RADIATION MODE TO MEASURE SEA WAVE CHARACTERISTICS

E. V. Voloshchenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

The analysis of ultrasonic methods for measuring the parameters of sea waves and the technical characteristics of the devices implementing them is carried out. Among the devices, the main attention is paid to the prospect of using a "virtual" parametric transmitting array (PTA) in a new way — as a tool for indirectly assessing the degree of sea surface roughness when measuring hydro conditions in coastal waters. The measurement scheme and methodology, the instrumentation of the measuring installation were opted to calibrate the employed PTA in the range of generated difference frequency waves, as well as to carry out model experiments to study the patterns of ultrasonic field scattering when irradiating several acoustically soft reflector plates with different parameters of the sinusoidal profile of irregularities. Based on the analysis of the results obtained, a method for measuring the parameters of rough sea surface is proposed, for example, for the mode of broadband bistatic irradiation (the oscillator and receiver are spaced apart) with ultrasonic signals from the bottom.

Keywords: parametric transmitting array, nonlinear acoustics, scattering of ultrasonic waves at rough water-air interface

REFERENCES

1. UNESCO. *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> (accessed 10.03.2024).
2. Volovov V.I., Krasnoborod'ko V.V., Lysanov Yu.P. *Akusticheskiy sposob opredeleniya vysoty morskikh voln* [Acoustic method for determining the height of sea waves]. Patent USSR no. N 412578 A1. Prioritet 25.01.1974. URL: <https://patentdb.ru/patent/412578> (In Russ.).
3. Molebnyi V.V. *Izmeritel' napravleniya morskikh voln* [Sea wave direction meter]. Patent USSR no. SU419826 A1. Prioritet 15.03.1974. URL: <https://patents.su/2-419826-izmeritel-napravleniya-morskikh-voln.html> (In Russ.).
4. Balakin R.A., Timets V.M. *Gidroakusticheskiy avtonomnyi volnograf* [Hydro-acoustic autonomous wave-maker]. Patent RF RU2011132211 A. Prioritet 10.02.2011. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2011132211A/ru>
5. Grekov A.N., Vasiliev D.M., Kotov M.N. [Acoustic measuring parameters of the waves]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Monitoring systems of environment], 2006, no. 9, pp. 51–56. URL: <https://msoe.ru/articles/2006/09-05/> (In Russ.).
6. Bogorodskii V.V., Yakovlev G.V., Korepin E.A., Dolzhikov A.K. *Gidroakusticheskaya tekhnika issledovaniya i osvoeniya okeana* [Hydroacoustic Techniques for Ocean Exploration and Development]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984. 263 p. (In Russ.).
7. Fissel D.B., Birch J.R., Borg K., Melling H. Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application. *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA, 3–6 May 1999. DOI: 10.4043/10794-MS
8. Strong B.S. *System and method for determining wave characteristics from a moving platform*. Patent USA US 2010302908 A1. Prioritet 02.12.2010.
9. Deines A. *Broadband acoustic doppler current profiler*. Patent USA US 5615173. Prioritet 25.03.1997.
10. Brumley B.H., Terray E.A., Strong B.S. *System and method for measuring wave directional spectrum and wave height*. Patent USA US 6282151 B1. Rowe-Deines Instruments Incorporated. Prioritet 28.08.2001.
11. Terray E.A., Brumley B.H., Strong B. Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP. *Proc. of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement*, 1999. P. 66–71. DOI: 10.1109/CCM.1999.755216
12. Keisuke A. *Multifrequency ultrasonic transducer*. Patent USA US 4490640. Prioritet 25.12.1984.
13. *Transducer*. Patent USA US 4209766 A. Prioritet 24.06.1980.
14. ZORA. *Advanced Technologies. Akusticheskiy lag Consilium SAL R1a* [Acoustic lag Consilium SAL R1a]. URL: https://zora.ru/?page_id=319 (accessed 10.03.2024). (In Russ.).
15. *Broadband acoustic transducer*. Patent USA US 5343443 A. Prioritet 30.08.1994.
16. *Teledyne RD Instruments*. (In Russ.). URL: <https://datchiki.com/manufacturers/teledyne-rd-instruments-flagman-gidrologii/>
17. Muir T.G. [Nonlinear acoustics and its role in marine sediment geophysics]. *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics of marine sediments] / Zhitkovskii Yu.Yu., transl. edit.. Moscow: Mir Publ., 1977. P. 227–273. (In Russ.).

18. Kobayakov Yu.S., Kudryavtsev N.N., Timoshenko V.I. *Konstruirovaniye gidroakusticheskoi rybopoiskovoi apparatury* [Design of hydroacoustic fish-finding equipment]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 272 p. (In Russ.).
19. Bakhvalov N.S., Zhileikin N.M., Zabolotskaya E.A. *Nelineinaya teoriya zvukovykh puchkov* [Nonlinear theory of sound beams]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 176 p. (In Russ.).
20. Kudryavtsev V.I. *Promyslovaya gidroakustika i rybolovatsiya* [Fishing hydroacoustics and fish locators]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1978. 312 p. (In Russ.).
21. Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. *Nelineinaya gidroakustika* [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).
22. Blinova L.P., Kolesnikov A.E., Langans L.B. *Akusticheskie izmereniya* [Acoustic measurements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1971. 271 p. (In Russ.).
23. Zagrai N.P. *Nelineinyye vzaimodeystviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh* [Nonlinear interactions in layered and inhomogeneous media]. Taganrog, TRTU Publ., 1998. 433 p. (In Russ.).
24. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. *Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy* [Hydroacoustic parametric systems]. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 2004. 400 p. (In Russ.).
25. Novikov B.K., Timoshenko V.I. *Parametricheskie anteny v gidrolokatsii* [Parametric antennas in sonar]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1989. 256 p. (In Russ.).
26. Evtuytov A.P., Mit'ko V.B. *Inzhenernye raschety v gidroakustike. 2-e izd., pererab. i dop.* [Engineering calculations in hydroacoustics. 2nd ed., rev. and ext.]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 288 p.
27. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P., Voloshchenko E.V. *Akusticheskii volnograf* [Acoustic Wavegraph]. Patent RF RU168083 U1. Prioritet 17.01.2017. (In Russ.).
URL: <https://patents.google.com/patent/RU168083U1/ru>
28. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. et al. *Akusticheskii sposob i ustroystvo izmereniya parametrov morskogo volneniya* [Acoustic method and device for measuring sea swell parameters]. Patent RF RU2721307 C1. Prioritet 18.05.2020. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2721307C1/ru> (In Russ.).
29. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. [Measurement of sea wave characteristics based on the application of nonlinear acoustic effects]. *Materialy Shestoi Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov: "Akustika sredy obitaniya (ASO-2021)"* [Proc. 6th All-Russ. conf. young sci. and spec. "Habitat Acoustics (ASO-2021)"]. Moscow: BMSTU Publ., 2021, pp. 70–75. (In Russ.). 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
30. Voloshchenko E.V., Voloshchenko V.Yu. *Mnogochastotnyi doplerovskii sposob izmerenii skorosti techenii v vodnoi srede* [Multi-frequency Doppler method of current velocity measurements in aquatic environment]. Patent RF RU2795579 C1. Prioritet 05.05.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru> (In Russ.).
31. Voloshchenko E.V. [The nonlinear acoustics application for increasing 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.).
32. 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. (In Russ.).
URL: <http://iairas.ru/mag/2024/abst2.php#abst10>

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

Article received by the editorial office on 22.04.2024

INTRODUCTION

Obtaining information about wind waves and currents in the aquatic environment is the main purpose of marine observations in the waters of ports, harbors, and bays. This requires the development of new research methods, laboratory and marine testing of various instruments, and real-time data telemetry. *In situ* surface wave measurements are an integral part of environmental monitoring programs, which are relevant for the calibration and verification of improved coastal wave models, in the design, construction, and operational planning of ports and harbors, etc., requiring the accumulation of a large amount of reliable and accurate experimental measuring data on the height, period, and direction of wave travel [1].

There are several methods and devices that implement them for measuring sea wave parameters [2–5], among which the traditional instrument is hydroacoustic pulse echo locators in the mono-static mode of an inverted echo sounder (upward or up-looking sonar) [6]. In this case, an electroacoustic transducer (EAT) is installed on the bottom surface and emits vertically upward ultrasonic pulses that are reflected from the water-air interface, the distance to which continuously changes according to the law characterizing sea disturbance. This makes it possible to record the wave profile of a traveling surface wind wave during measurements and determine its period, shape, and height. Thus, in this way, the problem is solved by the Wave Sonar of ASL Environmental Sciences (based on the development of Ice Profiling Sonar (IPS), an upward-looking sonar-profiler of the lower edge of the ice) [7]. The EAT is installed on the cover of a cylindrical body and emits short pulses of ultrasonic signals with a filling frequency of 420 kHz into the water in the direction normal to the water-air interface. The piston-type EAT provides an angular span $\theta_{0.7} = 1.8^\circ$ at the level (-3 dB) of the main lobe of the directivity characteristic (DC), which allows for both a small irradiation spot diameter on the sea surface (0.9, 3.1 and 6.3 m for distances of 30, 100 and 200 m, respectively), and a high spatial angular span. The device is installed as part of a submerged buoy station on a supporting buoy with floats, buried from the water surface at a distance of up to 225/55 m and secured at the required point of the underwater volume using a cable and a bottom anchor (depth of the water area up to 2000 m). The wave height is measured by a direct method based on the time delay of the pulse signal reflected from the surface of the water, which enables fairly high accuracy and reliability of measurements. The wave period is measured as a result of processing a series of experimental observations obtained by echo sounding with a frequency of at least two measurements per second. To measure the directional spectrum of waves, it is necessary to si-

multaneously use three synchronized instruments spaced along the bottom on some base and installed at the vertices of the triangle.

PROBLEM STATEMENT

Currently, there is a tendency to combine measurements of the characteristics of surface waves and currents [8–10] when carrying out regular monitoring in shallow waters, which requires the development of new technologies and instruments. In [11], the results of similar measurements are presented using Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) devices installed on the bottom surface, the feature of which is the use of systems of beams inclined relative to the vertical: Janus (four beams on the cardinal points) and Bugeye (3+1: three beams spaced 120° apart in the horizontal plane, plus one vertical, like a waveograph).

It should be noted that, in addition to the above, it is proposed in specific implementations of ADCP devices to use an ultrasonic signal of the required frequency, for example, a higher value for shallow water areas and vice versa, which allows obtaining information about the underwater situation with the required level of detail. This is achieved through further modernization of EAT designs, the main approach to which is described in [12, 13]. Initially, the problem of fish searching was solved by eliminating ultrasonic interference from the mutual influence of sonars installed on neighboring fishing vessels. The multi-resonance design of the EAT is ensured by the sequential combination of piezoelectric disks of the same/different diameters, arranged coaxially with their ends, and fastened through the central holes with a tie bolt. Electrical contacts are installed at the connection points, the location of which from one of its edges is, respectively, an eighth, a fourth, and a half of the resonant length of the assembled EAT.

According to designers, these devices, having various options for electrical connections, use several resonant frequencies, fairly evenly distributed in the range (15–200) kHz [12, 13] with acceptable sensitivity values in both emission and reception modes. The disadvantages of these rod EATs include large weight and dimensions, and design complexity. As an illustration of the above, we mention [14], which considers correlation logs of Consilium SAL (Speed Automatic Log) with complex structures of cylindrical antenna blocks made of piston resonant EATs. For example, TRU R1 (diameter 0.032 m, height 0.16 m and weight 3.7 kg) has two EATs with resonant frequencies of 3.84 and 4.196 MHz. The TRU antenna unit (diameter 0.12 m, height 0.144 m and weight 23 kg) is more complex: five EATs with a resonant frequency of 150 kHz for measuring the absolute speed of the vessel in the range of recorded depths (0–250) m (3 radiate, all five receive), two EATs with a resonant

frequency of 4 MHz for measuring the relative velocity via volumetric reverberation signals at a minimum depth of 3 m under the keel.

Increasing the number of working ultrasonic signals for ADCP devices due to the technological features of EAT manufacturing was proposed in [15].

The essence of the technical solution is to use the required number of impedance anisotropic matching layers in the form of disk pads that have specified values of thermal expansion coefficients when their volumes are artificially filled with matrix-fiber. The performance characteristics of typical EAT for ADCP devices are presented in Tab. 1 [16]:

Tab. 1. Technical characteristics of typical EAT for ADSP [16]

Let's analyze the data in Tab. 1. Indeed, the given figures correspond to the known relationship for approximate calculations of the angular width of the DC main lobe $\theta_{0,7}$ at the level of 0.7 (in degrees) for a flat piston EAT with a diameter d depending on its wave size d/λ , where $\lambda = c_0/f$ — wavelength and frequency f of the ultrasonic signal propagating at speed c_0 in the aquatic environment. As one would expect (see the right side of Tab. 1), the EAT operating modes differ: each ADCP provides the required range r at given levels of both emitted acoustic power W_A and the ultrasonic attenuation coefficient α in sea water. Claimed side field level $A_{\text{БП}}$ from (−36 dB) up to (−42 dB) is indicated for areas of the ultrasonic field (see [16, Fig. 23]) outside the 4th side interference lobe, i.e., when the observation point deviates by $\sim \pm 15^\circ$ relative to the EAT acoustic axis. Inside the solid sector ($\sim 30^\circ$), as expected, there are 1st, 2nd, 3rd etc. side lobes with levels of −18 dB (according to theory, 13% of the main one), −24 dB (according to theory, 6% of the main one), −28 dB (according to theory, 4% of the main one), etc., which may create unwanted interference at the receiving point. Let us clarify that in practice, in ADCP devices, when implementing measuring channels using beams of different configurations — both Janus and Bugeye [11] — it is still assumed that the same EATs are used, which limits the versatility of their use, for example, in irradiation from bottom to top from the bottom (depths up to 700 m) / near-surface (depths up to 25 m) shelf area. This is directly evident from the figures given in Tab. 1. Thus, for a range $r = 700$ m, they use an EAT with an operating frequency of 76.8 kHz with an ultrasonic attenuation of about 0.022–0.028 dB/m and radiating acoustic power $W_A = 250$ W, for a range $r = 120$ m, they use an EAT with an operating frequen-

cy of 307.2 kHz with an ultrasonic attenuation of about 0.062–0.084 dB/m and radiating acoustic power $W_A = 80$ W.

Note that in the process of designing hydroacoustic equipment, developers, by increasing the energy potential of the locator, try to obtain the maximum possible radiated power from the EAT. However, the aqueous medium has a nonlinearity in its elastic properties, which leads to the emergence of "new" spectral components during the propagation of an intense ultrasonic wave with frequency f (self-action) [17], for example, the generation of higher harmonic components with frequencies $2f, 3f, \dots, nf$. Let's estimate the operating modes of EAT in industrial ADCP samples in terms of linearity and nonlinearity. The performance characteristics are presented in [16]. The calculated data for the analysis are summarized in Tab. 2, in which the top three lines are for the EAT of ADCP devices, and the fourth is for the EAT of the Peskar echo sounder [18] in parametric emission mode (REM), which will allow for an objective comparison and outline a development trend.

Tab. 2. Calculation data

The mutual influence of nonlinear and diffraction effects in the ultrasonic field of an EAT using a piezoelectric element with radius a can be characterized by means of the Khokhlov parameter $N = l_p / l_{\text{Д}}$ [19], where $l_p = \rho_0 c_0^3 / \varepsilon \omega_0 p_0$ is the distance (m) of the formation of discontinuity of a plane wave with frequency $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ (rad/s) and amplitude of sound pressure p_0 (Pa) at the surface of the emitter; ρ_0, c_0 are the equilibrium values of density and speed of sound for water; $\varepsilon = 3.5$ is the nonlinear water parameter; $l_{\text{Д}} = a^2 \omega_0 / 2c_0$ is the length (m) of the Fresnel diffraction region for a pump wave with a central frequency ω_0 (rad/s). In [19], when numerically modeling the process of propagation of a sound beam in the aquatic environment, the ratio of nonlinear and diffraction effects, i.e., parameter N was set as follows: $N = 2.5$ — the nonlinearity is relatively weak, but sufficient for the formation of a shock wave in an ideal medium; $N = 1.6$ — medium nonlinearity and $N = 0.8$ — strong nonlinearity. From the Tab. 2 it can be seen that only for the EAT with a resonant frequency $f = 76.8$ kHz the nonlinearity of the aqueous medium can be neglected, while for the EAT with resonant frequencies $f = 153.6$ kHz and $f = 307.2$ kHz, the nonlinear operating mode is practically realized and the generation of higher harmonics takes place (nonlinear self-action effect).

SELECTION OF PARAMETRIC EMISSION ANTENNA MODEL AND EXPERIMENTAL SETUP LAYOUT

This conclusion is supported by the calculated and experimental values for the Peskar echo sounder EAT [18] in the mode of generating a difference frequency wave (DFW) $F_- = |f_2 - f_1| = 50$ kHz in the aquatic environment (bottom line of Tab. 2) when emitting pump signals with frequencies $f_1, f_2 = 250, 300$ kHz (nonlinear interaction effect), located within the pass-band (~ 60 kHz) of this EAT, and this is precisely what allows one to smoothly adjust the value of the DFW and, accordingly, its wavelength.

Thus, from the data presented in the second row from the bottom in Tab. 2, we can conclude that ADCP using EAT 4 with frequencies $f = 307.2$ kHz, can be attributed to an active location system operating within the framework of nonlinear acoustics, in particular, generating higher harmonic components with frequencies $2f, 3f, \dots, nf$. Let us analyze the calculated and experimental Peskar echo sounder emission spectrogram [18], displaying sound pressure levels for the components of the polyharmonic signal on the acoustic axis of the formed parametric transmitting array (PTA) for a distance of 10 m (Fig. 1).

Fig. 1. Calculated and experimental spectrogram of the Peskar echo sounder emission

It can be seen that the nonlinear interaction of pump signals with frequencies $f_1, f_2 = 250, 300$ kHz made it possible to expand the frequency range of the radiation not only downwards, but also upwards, for example, when using third harmonics up to 900 kHz, which practically covers the range of operating frequencies of all five EATs for ADCP from Tab. 1.

The sea surface is a moving and uneven interface and re-emits the ultrasonic field consisting of two components: a regular one, formed near the mirror direction, and a random one, forming a scattered field in the lower hemisphere. The ratio of the regular and random components of the re-emitted field is determined by the proportionality of the ultrasound wavelength λ and the distance h from the "tops" and "bottoms" of the traveling surface wave [20]. The above-mentioned feature of the broadband radiation of the virtual PTA, in particular using the "long-wave" DFW-spectral component, allows us to assume that the use of nonlinear acoustic effects in ADCP devices may be promising.

The ability to practically use high-intensity ultrasonic waves, i.e., nonlinear effects, is important for the development of modern applications in introscopy systems, medical diagnostics, underwater acoustics, etc. In the seventies of the last century in Taganrog [21], the main topic of nonlinear acoustics in the interests of both civil and military applications was the study of PTA, caused by the peculiarity of the DFW ultrasonic field — a constantly high directivity of the main lobe without a side lobe in significant band frequencies paired with the small weight and dimensional characteristics of the EAT. Thus, in metrology, much attention was paid to reducing the dimensions of equipment, increasing its productivity, and designing measuring instruments with a radiating path with acoustic parameters that vary little over a wide frequency band [22]. In this regard, work was carried out to develop a measuring wide-band PTA together with a set of radio-electronic equipment (REE) of the NAT (Nonlinear Acoustic Transducer), NAE (Nonlinear Acoustic Emitter) types as standard emitters for measuring the characteristics of hydroacoustic antennas and model hydrophones in pools of industrial testing laboratories [21]. The conditions of spatial limitation of measuring basins determined a number of requirements for both REE and EAT for PTA in the DFW generation mode. It generally corresponds to the conditions of our planned experiment to generate ultrasonic emission in a small and constant solid angle for a wide range of DFW wavelengths $\Lambda = c_0 / |f_2 - f_1|$ using EAT with high-frequency f_1, f_2 pumping and small ranges of both the near zone l_n , m, and the interaction zone l_3 , m.

Let's analyze the technical characteristics of some of them — NAT (3, 4) and NAE (5, 6, 8, 9), listed in [21, Tab. 2].

DFW wave frequency/ length range, kHz/m, — from 0.3/5 to 300/0.005;

angular width of the DC main lobe in the frequency range — from $(1.5 \pm 0.5)^\circ$ to $(5.0 \pm 0.5)^\circ$;

to cover the DFW range, up to two EATs with flat/slightly curved piezoelectric elements with diameters from 20 to 50 mm and resonant frequencies from 0.5 MHz to 4.75 MHz were used;

length of the near zone, m, — from 0.04 to 0.65;

spherical distribution zone, m, — from 0.3 to 3;

length of interaction zone, m, — from 0.8 to 15;

continuous/pulse operating mode;

pulse duration, ms, — (0.06–12.0);

pulse repetition frequency, Hz, — (0.5–400.0).

Note that these devices provided a small but stable sound pressure level — about 10 Pa at a distance of 3 m for DFW 10 kHz / 0.15 m, matching the required parameters of the technical specifications and solving the problem of developing new compact standard measuring instruments that allow laboratory calibration close to free-field conditions.

The diagram of the measuring setup for studying the PTA spatial characteristics, combining a spectral method based on the selection of the harmonic components of the generated polyharmonic signal, and observation of the shape of a multicomponent wave, is presented in Fig. 2. REE elements of the measuring setup are structured according to emission and reception paths, the acoustic path is highlighted in the most detail. Let's consider the operation of the setup. The electrical signal of the pump frequency f_1, f_2 beats from generation unit 1 (signal generators of special form AKIP GSS-05, GW Instek MFG-72120MA, adder, notch filters for suppressing the combination signals generated in the electronic path by 40–50 dB) is fed through power amplifier 2 (FRANKONIA VLC-220) to EAT 4. The additional outputs of blocks 1 and 2 enable synchronization of the functioning of the blocks in the emission and reception paths. An oscilloscope 3 (GW Instek GOS-6103C) makes it possible to monitor the parameters of the electrical signal supplied to the EAT 4, which is installed on a rotary-retractable unit (RRU) 7 in a specified part of the pool 5 (length 6 m, width 3 m, depth 2 m). Its internal surfaces are equipped with an absorbent coating 6.

Fig. 2. Block diagram of the measuring setup.

1 — signal conditioning block; 2 — signal power amplifier; 3 — oscilloscope; 4 — EAT; 5 — pool; 6 — internal absorbent coating; 7 — rotary-retractable unit; 8 — fresh water; 9 — formed PTA; 10 — reflector plate; 11 — hydrophone; 12 — matching cascade; 13 — oscilloscope; 14 — tunable resonant amplifier; 15 — spectrum analyzer; 16 — strobe unit; 17 — oscilloscope; 18 — detector; 19 — level recorder; 20 — ADC; 21 — computer

The pool 5 is filled with fresh water 8, which forms the acoustic path of the setup, the main element of which is the formed PTA 9, located in the middle part of the water volume of the pool 5. The acoustic path also includes an acoustically soft foam plastic reflector plate 10 that has a sinusoidal profile of irregularities on one of the faces and is placed at the same depth with the help of its RRU 7 near one absorptive wall of pool 5 (Fig. 2). Plate 10 is irradiated with ultrasonic signals in the planned model experiment.

Note that the purpose of this work is to assess the prospects for using hydroacoustic systems to measure the characteristics of sea waves using the parametric

emission mode. In this regard, as a simplified model of a wavy but static sea surface with given wave parameters, an acoustically soft foam plastic reflector plate 10 with a sinusoidal profile of irregularities on one of the faces was used. Foam plastic can be used to simulate an acoustically soft boundary, because the acoustic resistance of foam plastic is $0.048 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s} \ll$ the acoustic resistance of water $15 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, which determines the condition of the antiphase of incident and reflected ultrasonic waves.

When calculating the periodicity of the distribution of irregularities on the reflector plates 10, the principle of scaling was used. So, if in natural shelf conditions under irradiation from a depth of 100 m, three elements of surface waves with a wavelength of 5 m and a span of 1 m each fall into an illumination spot of 15 m in size, then for a laboratory experiment, a distance of ~ 1 m and the spot is reduced to 0.15 m, on which the same three elements with a wavelength 0.05 m each and a span of 0.01 m are placed.

Based on these considerations, the following spatial characteristics of the sinusoidal profile of the reflector plates 10 irregularities were chosen for the experiments: the distance between the maxima (minimum) on the reflecting surface $\lambda_{\text{ноб}} = 0.03, 0.05, 0.06$ m, a span of (double amplitude) $h = 0.002, 0.005, 0.010, 0.015, 0.02$ m, which, when recalculated for the shelf, are 3, 5, 6 m surface wavelengths, double amplitude 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2 m.

Based on the analysis presented above, to form the PTA, one of the EAT options was used, which was developed for NAE-9: the shape of the piezoelectric element is a flat disk with a diameter of $d = 21$ mm, fixed along the perimeter by gluing into a sealed housing; resonant frequency $f_0 = 2.12$ MHz/wavelength = $\lambda_0 = c_0 / f_0 = 0.708$ mm, where c_0 is the speed of sound in water (1500 m/s); the calculated value of the length of the near zone (Fresnel diffraction region) $l_{\text{дл}} = 0.45$ m. The values of frequencies f_1, f_2 were chosen based on the decrease (increase) of values relative to f_0 , for example, for a DFW $F_- = |f_2 - f_1| = 100$ kHz, the frequencies for pump waves are equal to $f_1 = (2120 - 50)$ kHz, $f_2 = (2120 + 50)$ kHz. Thus, in the acoustic path of the measuring setup, it was possible to change the DFW in the range of wavelengths Λ , mm, / frequencies F_- , kHz:

$$\Lambda = 21.4 \text{ mm} / F_- = 70 \text{ kHz};$$

$$\Lambda = 15 \text{ mm} / F_- = 100 \text{ kHz};$$

$$\Lambda = 10 \text{ mm} / F_- = 150 \text{ kHz};$$

$$\Lambda = 7.5 \text{ mm} / F_- = 200 \text{ kHz}.$$

The emission path made it possible to change the duration of the emission pulse in the range:

$\tau_{\text{min}} = (0.06 \div 0.1)$ ms and, accordingly, the spatial extent of the emission in water $l_{\text{min}} = (0.09 \div 0.15)$ m. The calculated value of the angular width $\Theta_{0.7}$ at the level of 0.7 for the ultrasonic pump beam with a resonant frequency f_0 was $\Theta_{0.7} = 60 \lambda / d = 2.023^\circ$. If we round the value of the beam width to $\sim 3^\circ$, then, with normal irradiation from distances of 1 m / 2 m / 3 m, the size of the spot on the surface of the reflector plate 10 with a sinusoidal profile of irregularities was about 5 cm / 10 cm / 16 cm. In this regard, the dimensions of the reflector plate 10 with a sinusoidal profile of irregularities were opted 20 × 30 cm, and the simulated sinusoidal profile of a "stopped" surface wave is made along the longer side, and its wave fronts are parallel to the shorter side.

As follows from Fig. 2, the resulting polyharmonic ultrasonic field of the PTA (spatial region 9 highlighted in gray on the acoustic axis of the EAT) was recorded by hydrophone 11 (Bruel & Kjaer 8103 with an operating frequency range from 4 kHz to 200 kHz), from the output of which the electrical signal through the matching stage 12 entered the input of a tunable resonant amplifier 14 (selective microvolts V6-1 or V6-2). The output of the tunable resonant amplifier 14 yields an electrical signal, proportional to the amplitude of the isolated spectral component, which is supplied to the input of oscilloscope 13 (GW Instek GOS-6103C), the sweep of which is triggered by a clock pulse from generation unit 1. In addition, the measuring setup allows you to evaluate the amplitude ratios of the components of a polyharmonic electrical signal in a wide frequency band by connecting a spectrum analyzer 15 (C 4-25). Experimental measurements of the spatial characteristics of the ultrasonic fields of spectral components generated by the PTA 9 in the aquatic environment 8 are carried out in pulsed mode using a strobe device 16, which makes it possible to isolate the information signal in time, removing masking interference. The parameters of the selected signal are measured using oscilloscope 17 (GW Instek GOS-6103C), and can also be recorded after detector 18 using level recorder 19 (Bruel & Kjaer 2307). Through ADC 20 (module E20-10) the obtained information goes to computer 21 (software "Power-Graph 3.3 Professional").

The structural diagrams of test benches described in [21, 23] differ from the one discussed above in that the acoustic path of the PTA uses plates that form both individual resonant acoustic filters and systems of absorbing layers of various shapes and sizes. These elements, simulating a set of interfaces between different media, were placed on the acoustic axis of the EAT in the region of nonlinear interaction of high-

frequency pump waves to both limit it and change its shape. Note that the purpose of the described experiment does not include artificial limitation of the interaction area; on the contrary, the natural formation of PTA in the hydroacoustic channel is assumed, which corresponds to the mode of measuring the characteristics of sea waves by hydroacoustic systems using PEM on the shelf when sounding from the side bottom. In our experiment, the reflector plate 10 with a sinusoidal profile of irregularities simulates an agitated water-air interface, i.e., a "stopped" surface wave, which scatters the DFW in a certain way and can make it possible to obtain information about surface disturbance during processing.

In [24, 25], the results of the development of PTAs with relatively low-frequency and high-intensity pump waves, which were used in long-range hydroacoustic systems, are presented and generalized; in particular, the DFW characteristics in layered media and in the presence of interfaces of extended length are considered. Thus, if the interface falls into the PTA interaction region, then, in addition to the distortion of its configuration, a part of the space appears where not only incident but also reflected waves interact, which affects the spatial characteristics of the resulting DFW emission field. This can complicate, for example, the detection of small objects located at the bottom or immersed in bottom soil, which is carried out against the background of a complex noise environment during top-down sounding from a surface vessel or an underwater towed carrier of the PTA [24].

EXPERIMENTAL RESULTS

Calibration of PTA as a measurement tool

To assess the main characteristics of PTA 9 as a proposed measuring instrument, which has an emission path with acoustic parameters little changing in a wide frequency band, a series of measurements of the spatial distributions of the amplitudes of the sound pressure of the DFW were carried out in the above range. For this purpose, EAT 4 and hydrophone 11 were installed in the middle part of the water volume 8 of the measuring pool 5 at a four-meter distance from each other. Final adjustment of their mutual placement on the horizontal acoustic axis of the EAT 4 was achieved by moving the hydrophone 11 "up-down" and "left-right", which resulted in obtaining the maximum pump signal level on the screen of the oscilloscope 13.

Typical results for a PTA generating ultrasonic DFW signal $F_- = |f_2 - f_1| = 150$ kHz in an aquatic environment 8 are presented in Fig. 3.

Fig. 3. Experimental axial (a) and angular normalized (β) distributions of sound pressure amplitudes for a PTA generating an ultrasonic DFW signal $F_- = |f_2 - f_1| = 150$ kHz in an aquatic environment

As a result of measurements, it was found:

1) It follows from Fig. 3 that the maximum DFW sound pressure is located approximately at a distance of 0.2 m, which is the boundary of the near zone of EAT 4 for pump waves. Previously, the value of the near zone was calculated to be 0.45 m; the decrease in its length is due to the conditions of fastening piezoelectric element in the EAT housing 4. Starting from a distance of 1 m, the amplitude of the sound pressure of the DFW smoothly decreases according to the law of spherical propagation, the DFW signal is formed and can be used for measurements, i.e., irradiation of the reflector plate 10.

2) The width of the DFW beam corresponds to the calculated DC value for pressure $R_p(\alpha)$, there are no side lobes on the DFW; the angular width of the HF main lobe is ~ 3 for $F_- = 150$ kHz, it also corresponds to the conditions for conducting research on the irradiation of reflector plate 10.

3) From Fig. 4, it can be seen that for the range from 50 kHz (30 mm) to 200 kHz (7.5 mm), the angular width of the main lobe of the PTA DC on the DFW is almost constant; the efficiency of the non-linear interaction process, i.e. the level of the generated amplitude of the sound pressure of the DFW increases with increasing value of F_- .

Fig. 4. Combined dependences of PTA as a means of measurement in an aquatic environment.

- - - angular width of the DC main lobe (left vertical axis);

— DFW sound pressure amplitude (right vertical axis P , dB relative to 1 Pa, reduced to distance 1m).

The graphs are given for the frequency range (kHz) / wavelengths (m) of the DFW (lower/upper horizontal axes, respectively)

As noted above, the calculated mutual influence of nonlinear and diffraction effects in the ultrasonic pump field of EAT 4 can be estimated using the Khokhlov parameter $N = l_p / l_d$, the value of which was ~ 2.4 ; i.e., nonlinearity is relatively weak. The calculated values $p_{01,02}$ of the amplitudes of the sound pressure of the pump signals at the surface of EAT 4 were about $0.075 \cdot 10^5$ Pa for each. The theoretical value of the length of the interaction region of the pump

signals is comparable to the maximum size of the water volume of the pool and was about 5 m, determined both by their frequency and the properties of the water propagation medium. Note that the presented data generally follow the known results published in [21]. Thus, the acoustic path has the necessary qualities, these are: the broadband probing signal, constancy of the irradiation area at the model interface, and the minimal masking effect of reverberation during measurements in a pool of limited volume, which allows us to conclude that it is possible to use PTA to conduct a model experiment on the study of ultrasound scattering at the interface with a sinusoidal profile of irregularities.

Scattering of the ultrasonic PTA-generated DFW field by a plate-reflector

By now, the model and theory of PTA have been developed for conditions of echo search for objects near a smooth water-air interface [24, 25] using the virtual source method. Its essence is that the influence of a flat water-air interface on ultrasound scattering is replaced by the influence of a virtual source of pump waves with similar frequencies f_1, f_2 , i.e., a virtual PTA, which fixed position in the air is determined by the laws of geometric optics. The pump waves reflected by the acoustically soft, unexcited water-air boundary have an additional phase shift by π radians, and, therefore, it is believed that the virtual PTA generates an "anti-phase" DFW relative to the signal previously formed by the real PTA (before reflection) in the aquatic medium. Based on this, the formation of a DFW "resulting" signal by the PTA upon reflection from a smooth free surface is presented as a result of the superposition of DFW signals from two PTAs that have a common acoustic axis in an aqueous environment but emit antiphase pump waves. The first PTA with a limited interaction zone is formed by EAT 4 and the section of the aquatic environment up to the smooth reflecting boundary. The second PTA is an emitter in the form of a section of a smooth interface that reflects the pump waves, and a region of water in which the beam further propagates. The superposition of two PTAs forms an ultrasonic field in which distortions in the smoothness of the change in the amplitude of the DFW sound pressure are observed both along and across the beam: for example, after reflection, a minimum is formed on the acoustic axis in the transverse distribution, the value of the minimum increases with distance from the interface [24, 25].

In our case, the water-air interface is disturbed, the surface wave propagates in the general travel direction with speed V , as a result, the slope of the surface wave profile relative to the normal in the irradiation region periodically changes. This leads to a periodic upward and downward displacement of the virtual "air" PTA

along the normal that connects it with the "underwater" PTA. This changes the process of formation of the resulting ultrasound field DFW, in particular, due to the shift of the acoustic axis of the virtual "air" PTA "in tact" with its displacement in the vertical plane relative to the stationary acoustic axis of the "underwater" PTA. Thus, during periods of oscillation, the agitated surface "redistributes" the ultrasonic energy of the reflected antiphase TRF within a certain angular sector, which can reduce the degree of amplitude distortion characteristics of the resulting signal in the hydroacoustic channel. Direct experimental measurements of such "dynamically changing" parameters of ultrasonic fields can be tied to certain difficulties, for example, due to the need to use three-dimensional gratings made of small-sized and similar hydrophones. In this regard, when conducting experiments, it is advisable to carry out physical modeling of the scattering of DFW ultrasonic fields at various values of grazing angles on a time-static and acoustically soft foam plastic reflector plate with a sinusoidal profile of irregularities.

The geometry of the experiment is shown schematically in Fig. 5.

Fig. 5. Geometry of the experiment according to Fig. 2: top view (a), experimental normalized distributions of the amplitudes of the DFW sound pressure for two models of irregularities (б).

On the graphs (б): 1 — graph for the model of small irregularities $h / \lambda = 2 \text{ mm} / 10.7 \text{ mm} = 0.19$, $F_- = 140 \text{ kHz}$;

2 — graph for the model of large irregularities $h / \lambda = 20 \text{ mm} / 7.5 \text{ mm} = 2.7$, $F_- = 200 \text{ kHz}$;

χ — the sliding angle, $\chi_0 = 20^\circ$ is the irradiation angle, М.И. — virtual source, Д.И. — actual source

In Fig. 5, a:

– the wavy line in the middle of the figure is the sinusoidal profile of the irradiated face of the reflector plate 10 with the surface wave length $\lambda_{\text{ноб}}$ and the height h of the irregularities h (above — foam plastic hatching 10, below — water hatching 8);

– bottom left — EAT 4 (actual source, Д.И.), forming the real "underwater" PTA 9;

– at the top left — two EAT 4 (virtual sources, М.И., lower and upper ones, ultrasound scattering from horizontal and inclined sections of a sinusoidal profile, respectively) of "air" PTA, which acoustic axes are spatially separated.

In Fig. 5, б, — two normalized dependences of the amplitudes of the DFW sound pressure (graphs 1 and 2 correspond to various values h / λ), recorded experimentally when moving the hydrophone 11 across the resulting ultrasonic field, which is set by the superposition of two DFWs: mirror-reflected (for real under-

water PTA 9, Д.И.) and scattered (for a virtual "air" PTA, i.e., "anti-phase" PTA, М.И.).

Criterion of acoustic flatness of rough surface and physical modeling of scattering processes on acoustically soft foam plastic reflector plate

As noted earlier, the implementation of regular monitoring of the water volume of the coastal water area and, in particular, the agitated water-air interface, necessitates the development of new technologies and devices, including the use of nonlinear acoustic effects. It is obvious that three modes of ultrasonic broadband irradiation from the bottom can be distinguished:

– inverted monostatic echo sounder [27];

– inclined monostatic irradiation [28];

– bistatic irradiation (in the first two cases, the ultrasound emitter and receiver are located nearby, in the third — they are separated in space).

As it is known, a beam of ultrasonic waves, falling on any uneven surface, is reflected from all its irradiated points according to the laws of geometric acoustics — the angle of incidence is equal to the angle of reflection. The reflected waves, summed up at the observation point, form, in accordance with the principle of superposition, an ultrasonic field, the nature of which will depend on the phase difference $\Delta\varphi = 4\pi(h/\lambda)\sin\chi$ of the elementary waves that simultaneously arrived at the point under consideration. Below, we will discuss the relationship for the criterion of acoustic flatness of the sea surface, in accordance with which the path difference Δr between the beams reflected from the upper and lower boundaries of surface irregularities should be less than $\lambda/4$ [20].

Fig. 6. To a conclusion about a relationship for the criterion of acoustic evenness of a rough surface [26]. Hatching: at the top — for the foam plastic reflector plate 10, at the bottom — for water 8

Let's consider two beams 1 and 3, incident on an uneven surface at an angle θ (Fig. 6) and find the phase difference between these beams after their reflection from different points on the surface. Let's draw a plane $z=0$ and move beam 3 to point D , denoting it 2. Since the phase difference between the beams 2 and 3 after reflection from the plane $z=0$ is zero, it is enough to find the phase difference between beams 1 and 2. The path difference between these beams Δr is equal to:

$$\Delta r = BC + CD = 2CD - AB, \quad CD = \frac{h}{\cos\theta},$$

$$AB = AD \sin \theta = 2h \operatorname{tg} \theta \sin \theta.$$

Consequently,

$\Delta r = \frac{2h}{\cos \theta} - 2h \operatorname{tg} \theta \sin \theta = 2h \cos \theta$, and the phase difference through the grazing angle is: $\chi = (90^\circ - \theta)$, $\Delta \varphi = k \Delta r = 2kh \sin \chi$. It can be seen that when ultrasound is reflected from an uneven surface, the relationship between the length of the incident ultrasonic wave λ and the size of the irregularities h of this surface plays an important role, and the condition under which the reflecting surface can be considered acoustically smooth, i.e., reflecting specularly, has the form [26]:

$$h / \lambda \leq 1 / (8 \sin \chi).$$

This determined the geometry (Fig. 5) of the physical modeling of scattering processes on an acoustically foam plastic reflector plate 10 with a sinusoidal profile of irregularities, for example, during bistatic irradiation.

For the experiments, the following spatial characteristics of reflector plates 10 were chosen: the distance between the maxima (minimum) on the reflecting surface $\lambda_{\text{ноб}} = 0.05$ m with a span (double amplitude) of $h = 2$ mm and $h = 20$ mm (Fig. 5). If we take into account that the acoustic path of the measuring setup made it possible to change the DFW in the range of wavelengths Λ from $\Lambda = 21.4$ mm to $\Lambda = 7.5$ mm, it is obvious that at small grazing angles χ (up to 30°) it is possible to implement various options for irradiating reflector plates 10 within the models of both small (first option) and large irregularities (second option).

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS

A foam plastic plate-reflector 10 with a sinusoidal profile of irregularities on the working surface (Fig. 2) is located in a hydroacoustic pool 5 in an aquatic environment 8 and is DFW-irradiated at a sliding angle χ_0 from the PIA 9. The plate is fixed in a holder, immersed in water and is in a vertical position due to the weights attached below, has the ability to be fixedly rotated relative to the vertical axis using the RRU 7, and is located at a distance of about 1.4 m along the acoustic axis of the PTA 9.

It should be noted that the experimental results presented in Figs. 5, 6, and 7 are typical in the series conducted, and the convenience of their subsequent comparative analysis is due to the use of the same value of any parameter in measurements, for example, an irradiation angle of $\chi_0 = 20^\circ$ with two different DFWs $F_- = 140$ kHz and 200 kHz (Fig. 5, 6) or

DFW $F_- = 180$ kHz with two different values of irradiation angle $\chi_0 = 30^\circ$ and 16° (Fig. 7).

So, it follows from Fig. 5, 6, graph 1 for the model of small irregularities ($h / \Lambda = 2 \text{ mm} / 10.7 \text{ mm} = 0.19$, $F_- = 140$ kHz):

1) the shape and angular width of the main lobe of PTA 9 have practically not changed, the direction of the DFW main lobe during reflection ($\sim 20^\circ$) obeys the laws of geometric acoustics, i.e., the model of small irregularities used can be considered acoustically smooth and specularly reflective;

2) in the sector $\sim 22^\circ \div 28^\circ$ (the direction of the acoustic axis of the virtual "anti-phase" PTA is about 24°), an emerging interference pattern for the DFW is observed with an average normalized amplitude of about 0.2;

3) "anti-phase/co-phase" of this DFW signal relative to the mirrored DFW has not been found because, in the aquatic environment, the acoustic axes of both PTAs are spaced apart ($\sim 4^\circ$), however, it can be noted that for the direction $\sim 23^\circ$ there is a distortion of the known dependence of the dynamics of the decay of the DFW amplitude for off-axis directions.

It follows from Fig. 5, 6, graph 2 for the model of large irregularities ($h / \Lambda = 20 \text{ mm} / 7.5 \text{ mm} = 2.7$, $F_- = 200$ kHz):

1) the main lobe of PTA 9 is significantly changed as a result of scattering, in particular, its amplitude, shape, and angular width have changed, which can be explained by the dephasing of the DFW from the real "underwater" PTA 9, i.e., the used model of large irregularities cannot be considered acoustically smooth and specularly reflective;

2) in the sector $\sim 16^\circ \div 26^\circ$ (the direction of the acoustic axis of the virtual "anti-phase" PTA is about 24°) an interference pattern is observed for the DFW with an average normalized amplitude of about 0.5, in which significant fluctuations are present;

3) it can be assumed that in an aquatic environment, the acoustic axes of both PTAs are separated in space ($\sim 5^\circ$), and it is clear that when ultrasound is scattered by this model, the mutual influence of "different-phase" DFWs from both PTAs leads to the destruction of the PTA as a research tool.

Fig. 7. Experimental normalized distributions of DFW sound pressure amplitudes for two models of irregularities at $F_- = 180$ kHz.
a — model of small irregularities: $h / \Lambda = 2 \text{ mm} / 8.3 \text{ mm} = 0.23$, $\chi_0 = 30^\circ$;
6 — model of large irregularities: $h / \Lambda = 20 \text{ mm} / 8.3 \text{ mm} = 2.4$, $\chi_0 = 16^\circ$

It follows from Fig. 7, a, for the model of small irregularities ($h/\lambda = 2\text{ mm}/8.3\text{ mm} = 0.23$,

$F_- = 180\text{ kHz}$, irradiation angle $\chi_0 = 30^\circ$):

1) the shape and angular width of the main lobe of PTA 9 have not changed, the direction of the main lobe on the DFW during reflection ($\sim 30^\circ$) obeys the laws of geometric acoustics, i.e., the model of small irregularities used can be considered acoustically smooth and specularly reflective;

2) in the sector $\sim 32^\circ\div 38^\circ$ (the direction of the acoustic axis of the virtual "anti-phase" PTA is about 35°), the formation of an interference pattern for the DFW is observed at an average normalized amplitude of about 0.2;

3) "anti-phase/co-phase" of this DFW signal relative to the mirrored DFW has not been found because, in an aquatic environment, the acoustic axes of both PTAs are separated in space, however, it can be noted that for the direction $\sim 32^\circ$ there is a distortion of the known dependence of the dynamics of the decay of the DFW amplitude for off-axis directions.

It follows from Fig. 7, b, for the model of large irregularities ($h/\lambda = 20\text{ mm}/8.3\text{ mm} = 2.4$,

$F_- = 180\text{ kHz}$, irradiation angle $\chi_0 = 16^\circ$):

1) the main lobe of PTA 9 is significantly changed as a result of scattering, in particular, its amplitude, shape, and angular width have changed, which can be explained by the dephasing of the DFW from the real "underwater" PTA 9, i.e., the used model of large irregularities cannot be considered acoustically smooth and specularly reflective;

2) in the sector $\sim 12^\circ\div 22^\circ$ (the direction of the acoustic axis of the virtual "anti-phase" PTA is about 19°) an interference pattern is observed for the DFW at an average normalized amplitude of about 0.6, in which significant fluctuations are present;

3) it can be assumed that in an aquatic environment, the acoustic axes of both PTAs are separated in space ($\sim 5^\circ$), and it is clear that when ultrasound is scattered by this model, the mutual influence of "different-phase" DFWs from both PTAs leads to the destruction of the PTA as a research tool.

It is important to note that, other things being equal, the use of a model surface with large irregularities (20 mm) led to "dephasing" of the reflected DFW ultrasonic signal, which before reflection, was formed by a PTA (Figs. 5, 7). Thus, for the PTA-generated DFW, the conclusion from [20] is valid: the ultrasonic field re-emitted by the model surface consists of two components — a regular one, formed near the mirror direction, and a random one, forming a scattered field in the lower hemisphere; their ratio is determined by the proportionality of the ultrasonic wavelength and the height h of the traveling surface wave.

CONCLUSION

Analysis of the results obtained allows us to propose a new method for measuring the parameters of a rough sea surface, for example, for the mode of broadband bistatic irradiation (the emitter and receiver are spaced apart) with ultrasonic signals from the bottom. The essence of the proposal can be seen most clearly from the analysis of Fig. 5. It is obvious that, as presented in Fig. 5, the transverse normalized distributions have clear differences from each other, and if in the experiment for the model of large irregularities we use the broadband emission of PTA 9 and rearrange the DFW emission to $F_- = 20.25\text{ kHz}$,

$\Lambda = 74.07\text{ mm}$, then the experiment can be switched to the mode of small irregularities model. This technique — the possibility of adjusting the wavelength of the sounding signal to the characteristics of the existing sea waves if the spatial distribution of the scattered ultrasonic field is recorded — gives grounds to assume the applicability of hydroacoustic systems using the parametric emission mode for studying the parameters of the rough surface, in particular, indirect assessment of the size of irregularities h on it. It should be noted that in [31] an analysis of the use of hydroacoustic active location systems with receiver-emitting antennas of an original design is presented. They can be placed on the bottom of a shallow water area and used both for emission and recording the distribution of the DFW scattered field, i.e., to obtain information about hydraulic conditions in accordance with the proposed method. The disadvantage of PTA with biharmonic pumping is the decrease in the efficiency of DFW generation (Fig. 4) upon transition to the long-wavelength range, corresponding to the parameters of real rough sea waves, however, in [32] the possibility of changing the operational characteristics of PTA with multi-component pump signal is considered, in particular, to increase the energy potential of the emerging low-frequency signals of multiple frequencies in the event of a constant width of the main lobe of the directivity characteristics (DC).

The topic of research described in this article is a continuation of the works [27–32], and corresponds to the direction of research — the development of technical fundamentals of devices, instruments, systems and measurement methods in the field of acoustics of aquatic environments: emission, reception and processing of sound signals, acoustic monitoring of water bodies.