

УДК 551.46.086; 534.222.2

© Е. В. Волощенко, 2024

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ АНТЕННА С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ СИГНАЛОМ НАКАЧКИ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ

В статье рассмотрена возможность изменения эксплуатационных характеристик параметрической излучающей антенны (ПИА) с многокомпонентным сигналом накачки, в частности для повышения энергетического потенциала на формирующихся низкочастотных сигналах кратных частот при неизменной ширине основного лепестка характеристики направленности. Это достигается за счет использования в качестве сигнала накачки фазированных спектральных составляющих, находящихся в полосе пропускания излучающего электроакустического преобразователя, разность частот которых и определяет состав полигармонического низкочастотного сигнала, генерирующегося в водной среде. Данный способ формирования ПИА позволяет увеличить эффективность генерации зондирующих сигналов именно в длинноволновом диапазоне, что актуально при осуществлении измерений параметров движения слоистой морской среды. Особенности формирования широкополосного излучения волн разностной частоты позволяет использовать "бестелесную" ПИА в новом качестве — как инструмент для косвенной оценки степени неровности поверхности моря при проведении измерений гидроусловий на прибрежной акватории.

*Кл. сл.:* параметрическая излучающая антенна, гидроакустический мониторинг

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных инженерных направлений, связанных с развитием методов исследований и разработки аппаратуры для освоения прибрежно-шельфовой зоны, является рассмотрение вопросов рассеяния ультразвуковых (УЗ) сигналов морской поверхностью. Актуальным аспектом исследований в этой области является изучение возможностей решения обратной задачи рассеяния — определение в широкой полосе частот параметров морской поверхности по характеристикам рассеянных ею сигналов. Следует отметить, что гидроакустические интерференционные антенны для осуществления направленного излучения в низкочастотном диапазоне имеют значительные весогабаритные характеристики, что осложняет их применение на практике. Возможным направлением решения данной технической проблемы является применение "бестелесной" параметрической излучающей антенны (ПИА), функционирование которой основано на нелинейном взаимодействии мощных УЗ-волн с частотами  $f_1, f_2$ , которые, распространяясь в водной среде, формируют гидродинамические возмущения комбинационных частот, в частности и волну разностной частоты (ВРЧ)  $F = |f_1 - f_2|$ .

### КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

#### Общие положения

Отмеченное выше нелинейное взаимодействие является эффектом второго порядка малости, вследствие чего задача повышения эффективности преобразования энергии волн накачки в ВРЧ актуальна. Пространственное распределение амплитуд ВРЧ зависит от характеристик водной среды — нелинейного параметра  $\epsilon$ , плотности  $\rho_0$ , скорости звука  $c_0$ , — коэффициентов затухания волн накачки  $\alpha_{1,2}$  и ВРЧ  $\alpha_-$ , а также амплитуд звукового давления  $p_{01}, p_{02}$  волн накачки с частотами  $f_1, f_2$  у поверхности электроакустического преобразователя (ЭАП), его полосы пропускания, т.е. значения циклической ВРЧ  $\Omega = 2\pi|f_1 - f_2|$ , и расстояния дифракции  $l_d$  для волн накачки. Повышение эффективности излучающей ПИА может быть достигнуто несколькими путями:

- 1) изменение геометрических параметров зоны взаимодействия ПИА для увеличения амплитуд звукового давления волн накачки [1, с. 36–55, 111–217];
- 2) заполнение зоны нелинейного взаимодействия мощных УЗ-волн твердой или жидкой проме-

жуточной средой, обладающей повышенной величиной в сравнении с водой нелинейного параметра в сочетании с дисперсией [2];

3) выбор вида модуляции и соответствующих схем формирования электрических сигналов в излучающем тракте для возбуждения ЭАП, фазировка волн накачки и применение фокусированных УЗ-пучков в зоне взаимодействия [3, 4].

Проблема увеличения эффективности сонаров с параметрическими излучающими трактами рассмотрена в [5, 6]. Рассмотрим более подробно [5].

### Критический анализ предложенного в [5] решения

Целью патента заявлено увеличение эффективности локационной системы с несколькими (не менее двух) параметрическими излучающими трактами, в каждом из которых последовательно соединены генератор, усилитель мощности, резонансный ЭАП накачки. Каждый параметрический тракт излучает в водную среду УЗ-энергию на нескольких частотах накачки (две, три, четыре, пять), что приводит к нелинейной генерации набора сигналов разностных частот и, по мнению авторов, к увеличению эффективности сонара. Этой же цели служит применение одной или нескольких интерференционных приемных антенн, особенностью которых является их выполнение в виде прямой линии, на которой заданным образом распределены гидрофоны. Обсудим некоторые моменты. Как следует из [5, фиг. 1–4], в каждом параметрическом излучающем тракте — "свой" резонансный ЭАП накачки (acoustic projector, AP), размещенный в "своей" точке пространства, причем излучающий "свой", отличающийся по частоте сигнал накачки. Например, из [5, фиг. 4] — сигналов накачки пять: 1 (80 кГц), 2 (83 кГц), 3 (86 кГц), 4 (89 кГц), 5 (92 кГц), которые "комбинируют попарно" волны разностных частот (ВРЧ): 1 – 2 (3 кГц), 1 – 3 (3 кГц), 1 – 4 (3 кГц), 1 – 5 (3 кГц), 2 – 3 (6 кГц), 2 – 4 (6 кГц), 2 – 5 (6 кГц), 3 – 4 (9 кГц), 3 – 5 (9 кГц), 4 – 5 (12 кГц).

Вызывает сомнение эффективность нелинейной генерации отдельных ВРЧ, например 1 – 4 и 1 – 5, для которых ЭАП (AP) разнесены в пространстве, т.к. "параметрический источник звука представляет собой объемную антенну, излучающую вдоль оси и занимающую часть пространства непосредственно перед ЭАП" [7]. Интересно проанализировать утверждение авторов патента [5] "рост количества взаимодействий волн накачки линейно увеличивает эффективность параметрического сонара", причем обоснование этого следующее. Так, если сигналов накачки два — 80 кГц, 83 кГц, — то ВРЧ одна — 3 кГц с эффективностью генерации 1%. Далее, если сигналов накачки три —

80 кГц, 83 кГц, 86 кГц, — то ВРЧ три — 3 кГц, 3 кГц и 6 кГц с эффективностью генерации 1% каждая, т.е. в целом 3% и т.д. А для пяти сигналов накачки (см. [5, фиг. 4], набор частот выше) эффективность генерации 12%! Таким образом, предложен "принцип энергетического сложения сигналов", т.е. превалирует корпускулярный подход, о волновой природе ВРЧ, в частности о сфазированном (constructive interference — усилении) или противофазном (destructive interference — ослаблении) сложении когерентных сигналов — компонент ВРЧ с кратными частотами — нет и речи.

### Критический анализ предложенного в [8] решения

Использование трехкомпонентной (амплитудно-модулированной) волны накачки для повышения эффективности ПИА предложено в [8]. Излучающий тракт устройства, реализующего этот способ, содержит генераторы электрических колебаний высокой частоты  $f$  и частоты  $F$  модуляции, выходы которых через амплитудный модулятор, соединены с импульсным модулятором, который управляется импульсным генератором. Далее электрический сигнал подается через усилитель мощности, режекторный фильтр на ЭАП накачки, пьезоэлемент которого колеблется на основной толщиной моде (резонансная частота  $f_0$ ) в режиме одностороннего поршневого излучения в водную среду. В результате обеспечен для пьезоэлемента режим односторонней передачи колебаний в среду лоцирования, что вызывает распространение УЗ-волн накачки с циклическими частотами

$$\omega_1 = 2\pi(f_0 - F) < \omega_0 = 2\pi f_0 < \omega_2 = 2\pi(f_0 + F)$$

(несущая частота и две боковые спектральные составляющие) и волновыми векторами  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_0, \mathbf{k}_2$ . Таким образом, в среде лоцирования сформирована общая пространственная область коллинеарного распространения и нелинейного взаимодействия интенсивных УЗ-волн накачки как с несущей частотой, так и с каждой из боковых спектральных составляющих, включающая в себя как ближнюю, так и дальнюю зоны образовавшейся ПИА. Сигнал гармонической однотонной амплитудной модуляции имеет вид

$$U = U_m \cos 2\pi ft + \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi(f + F)t + \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi(f - F)t, \quad (1)$$

где  $U$  и  $U_m$  — мгновенное и амплитудное значение электрического сигнала,  $m$  — коэффициент модуляции, причем максимально возможное значение боковых спектральных составляющих при  $0 \leq m \leq 1$  равно  $U_m/2$ , а фазы симметричны относительно фазы несущего колебания,  $f$  — несущая частота,  $F$  — частота модуляции,  $(f_1 + f_2)/2 = f_0$ .

Режим параметрического излучения (РПИ) при таком методе формирования позволяет генерировать величину амплитуды звукового давления первой НЧ — гармонику ВРЧ на 3 дБ большую, чем при любой другой схеме формирования.

Однако рассмотренный способ повышения эффективности ПИА обладает рядом недостатков:

1) полоса пропускания электронного тракта и ЭАП должна быть равна удвоенной частоте модулирующего колебания, что создает трудности при реализации электронных схем формирования и конструкции антенной системы;

2) эффективность ПИА снижена за счет "паразитной" генерации второй НЧ гармоники ВРЧ с частотой  $2F$ , амплитуда которой при стопроцентной модуляции ( $m=1$ ) всего в  $m/2$  раз, отличается от амплитуды первой гармоники ВРЧ;

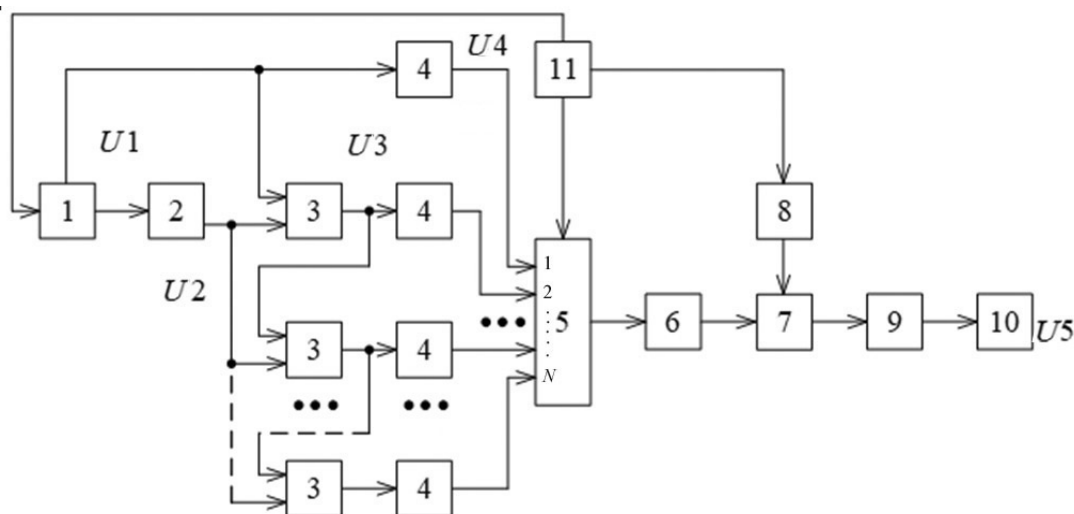
3) основной лепесток ПИА в режиме "насыщения" значительно расширяется и искажается: форма характеристики направленности (ХН) становится

амплитудно-зависимой, появляется провал в уровне излучения на акустической оси ПИА.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Актуальность осуществления исследований характеристик ПИА с повышенным энергетическим потенциалом обусловила необходимость выбора приемлемой схемы формирования электрического сигнала накачки, содержащего заданное число фазосвязанных компонент, что было осуществлено с использованием [9].

Излучающий тракт ПИА с  $N$ -компонентным сигналом накачки [10] (рис. 1) содержит опорный генератор 1, первый выход которого через формирователь задержанных импульсов 2 соединен со вторыми входами схем совпадения 3. Выходы схем совпадения 3 и второй выход опорного генератора 1 через делители частоты 4 соединены с  $N$  сигнальными входами (рис. 1) аналогового ключа 5. Последовательно соединенные схемы совпадения 3 и делители частоты 4 с одинаковым коэффициентом деления образуют  $(N - 1)$  параллельно включенных звеньев. Соединения первых входов схем совпадения 3 в параллельно включенных звеньях осуществлены исходя из того, что в каждом звене должно осуществляться понижение частоты опорного генератора 1.



**Рис. 1.** Структурная схема устройства для реализации способа [10]

1 — опорный генератор; 2 — формирователь задержанных импульсов; 3 — схема совпадения,  $(N - 1)$  ед.; 4 — делитель частоты,  $N$  ед.; 5 — аналоговый ключ; 6 — сумматор; 7 — амплитудный модулятор; 8 — импульсный генератор; 9 — усилитель мощности; 10 — вход ЭАП; 11 — блок управления и регулировок.

$U_1, U_2, U_5$  — электрические сигналы;  $U_3$  —  $(N - 1)$  сигнальных линий;  $U_4$  —  $N$  сигнальных линий

Сформированные колебания  $U4$  (группа из  $N$  сигналов) с одинаковыми как амплитудой, так и начальной фазой (в момент времени  $t=0$ ) поступают на  $N$  сигнальных входов аналогового ключа 5. Управляющий вход аналогового ключа 5 соединен со вторым выходом блока управления 11, первый и третий выходы последнего соединены с управляющими входами как опорного генератора 1, так и импульсного генератора 8. Аналоговый ключ 5 через сумматор 6, амплитудный модулятор 7, усилитель мощности 9 соединен со входом ЭАП 10. Режим работы амплитудного модулятора 7 задается импульсным генератором 8. Управляющие выходы блока управления и регулировок 11 соединены со входами управления аналогового ключа 5, опорного генератора 1 и импульсного генератора 8, что позволяет выбрать импульсный или непрерывный режим работы ПИА.

Функционирование устройства для реализации способа управления эффективностью генерации ВРЧ [10] за счет излучения в водную среду многокомпонентного фазосвязанного сигнала накачки происходит следующим образом. Для формирования необходимого количества компонент сигнала накачки оператор через блок управления и настройки 11 запускает опорный генератор 1, вырабатывающий электрический сигнал  $U1$  в виде непрерывной последовательности импульсов с частотой  $f_0$  при заданной полярности и фазовых соотношениях. Сигнал  $U1$  поступает непосредственно на входы как формирователя задержанных импульсов 2, так и делителя частоты 4, а с выхода последнего как сигнал  $U4$  на один из входов аналогового ключа 5. Электрический сигнал  $U1$  поступает на первый вход схемы совпадения 3, в то время как на второй вход схемы совпадения 3 поступает электрический сигнал  $U2$  с выхода формирователя задержанных импульсов 2. На первые входы всех остальных схем совпадения 3 подаются сигналы  $U3$  с предыдущей по иерархии параллельной линии (см. рис. 1). На выходе схемы совпадения 3 образуется последовательность импульсов с вырезанными периодами (от одного до нескольких на выходах разных схем совпадения 3). Если обозначить количество импульсов опорного генератора 1, помещающихся в периоде вырезания, числом  $m$ , а количество вырезанных импульсов числом  $k$ , то частота искомого спектра будет соотноситься следующим образом:

$$F_k = [(m-k) / m] \cdot F_0,$$

при этом  $F_0 = f_0 / 2^n$ , где  $f_0$  — частота опорного генератора,  $2^n$  — коэффициент деления,  $n$  — число делений на два. В данной схеме шаг спектра

многокомпонентного сигнала накачки или "разностная" частота определяется как  $F_- = F_0 / m$ .

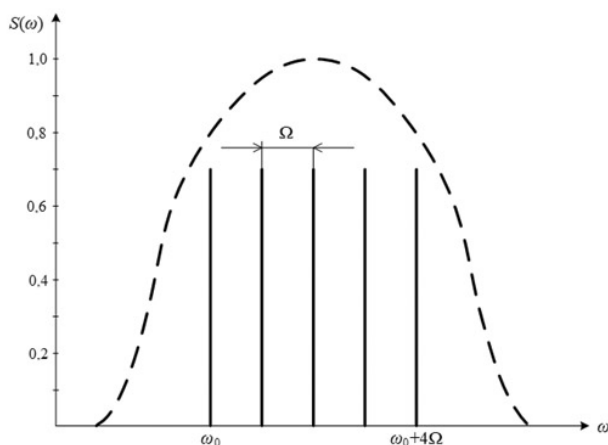
При соответствующей команде оператора, поступающей через блок управления и настройки 11 на управляющий вход аналогового ключа 5, устанавливается количество спектральных составляющих, необходимое для формирования заданного варианта многокомпонентного сигнала возбуждения. Электрический многокомпонентный сигнал возбуждения, образующийся на выходе сумматора 6, представляет собой сумму  $N$  колебаний и имеет вид

$$S(t) = \sum_{v=0}^{N-1} \sin(\omega_1 + v\Omega)t = N \left[ \sin\left(\frac{N\Omega t}{2}\right) / N \sin\left(\frac{\Omega t}{2}\right) \right] \sin \omega_m t, \quad (2)$$

где  $\omega_m = \omega_1 + (N-1)\Omega/2$  — является средней частотой. В момент времени  $t=0$  все колебания находятся в одной фазе, с течением времени вследствие различия их частот образуется при сложении система максимумов и первый нуль получается в момент времени  $t$ , определяемый из равенства  $(N\Omega t/2) = \pi$ , откуда  $t = 2\pi / (N\Omega) = 1 / (NF_-)$ .

Нули знаменателя определяют главный максимум, период биений определяется числом главных максимумов в единицу времени, т.е. нулевыми значениями знаменателя  $(\Omega t/2) = \pi \cdot n$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Откуда  $t = n / F_-$ ;  $\Delta t = 1 / F_-$ .

На рис. 2 схематично изображен спектр многокомпонентного сигнала накачки (при  $N=5$ ), из которого видно, что в полосе пропускания пьезоэлемента (штриховая линия) ЭАП 10 расположены пять спектральных компонент сигнала накачки (сплошные линии) с частотами  $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 + 2\Omega, \omega_0 + 3\Omega, \omega_0 + 4\Omega$ , каждая из которых разнесена на частотной оси на величину циклической ВРЧ  $\Omega$ . С выхода сумматора 6 (рис. 1) многокомпонентный сигнал накачки поступает на импульсный модулятор 7, управляющий вход которого соединен с дополнительным выходом импульсного генератора 8. Далее сигнал после усилителя мощности 9 поступает на пьезоэлемент ЭАП 10. Пьезоэлемент может иметь форму, например, стержня резонансного размера  $l_{\text{СТ}} = c_{\text{СТ}} / 2f$ , где  $c_{\text{СТ}}$  — скорость звука в стержне,  $f$  — резонансная частота его колебаний [11], причем полуволновый пьезоэлемент в силу пьезоэлектрических свойств совершает колебания. Эти колебания передаются в водную среду, обладающую нелинейностью упругих свойств, и распространяются в виде импульсов  $U5$ , содержащих сгущения и разряжения среды.



**Рис. 2.** Спектр многокомпонентного ( $N = 5$ ) сигнала накачки в полосе пропускания пьезоэлемента ЭАП [10]

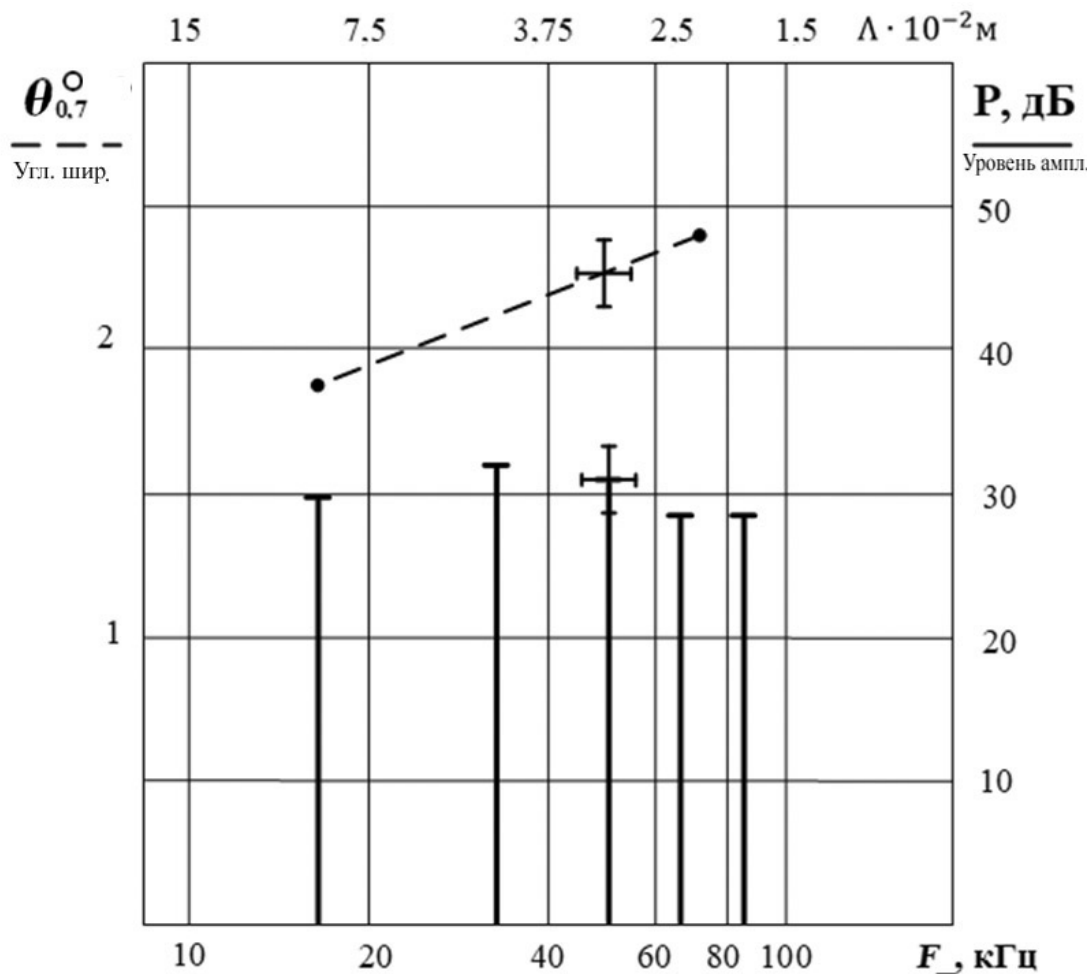
В протяженном участке среды, включающем ближнюю и дальнюю зоны ЭАП 10, формируется пространственная область коллинеарного распространения и нелинейного взаимодействия интенсивных компонент накачки с частотами  $\omega_0$ ,  $\omega_0 + \Omega$ ,  $\omega_0 + 2\Omega$ ,  $\omega_0 + 3\Omega$ ,  $\omega_0 + 4\Omega$ . Многокомпонентный сигнал накачки  $U_5$  представляет собой сумму сфазированных спектральных составляющих, частоты которых отличаются между собой на малую величину циклической ВРЧ  $\Omega$ . За счет квадратичной нелинейности среды распространения и при выполнении пространственно-временного согласования интенсивных компонент накачки в ПИА генерируются спектральные компоненты комбинационных ВРЧ — гармоники ВРЧ  $\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ . Первую гармонику ВРЧ  $\Omega$  генерируют наибольшее количество спектральных составляющих из многокомпонентного сигнала накачки. Например, при пятикомпонентной накачке ее источники образуются за счет четырех пар нелинейных взаимодействий компонент 1 – 2, 2 – 3, 3 – 4, 4 – 5; для второй гармоники ВРЧ  $2\Omega$  — за счет трех пар нелинейных взаимодействий компонент 1 – 3, 3 – 5, 2 – 4 и т.д. Таким образом, для ПИА увеличение эффективности генерации спектральных компонент комбинационных ВРЧ, т.е. гармоник ВРЧ  $\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ , ..., наиболее существенно для низкочастотной ВРЧ, т.е. первой гармоники. Оператор по команде через блок управления и настройки 11 коммутирует аналоговый ключ 5, обеспечивая поступление на вход сумматора 6 необходимого количества  $N$  используемых спектральных составляющих в заданной реализации многокомпонентного сигнала накачки.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА

### Экспериментальные характеристики

Преимущества предлагаемого способа формирования ПИА подтверждены модельными экспериментальными исследованиями, выполненными в лабораторных условиях. Использовался ЭАП 10 с круглым плоским пьезоэлементом диаметром 20 мм с резонансной частотой 1.98 МГц (длина ближней зоны  $l_d \sim 0.15$  м) и полосой пропускания 200 кГц, что позволило использовать от двух до шести спектральных составляющих (последовательно отстоящие друг от друга на  $F_- = 16.5$  кГц фазосвязанные компоненты, рис. 2) при формировании многокомпонентного сигнала накачки [12]. Как и ожидалось, увеличение количества  $N$  (от 2 до 6) используемых фазосвязанных спектральных составляющих в многокомпонентном сигнале накачки обуславливает динамичный прирост генерации ВРЧ (при  $N = 3$  и 4), в то время как дальнейшее увеличение числа составляющих (до 5 и 6 в сигнале накачки) вызвало насыщение динамики прироста. Так, уровень звукового давления ВРЧ  $F_- = 16.5$  кГц на оси ЭАП 10 для шестикомпонентного сигнала на  $\sim 5$  дБ больше уровня звукового давления ВРЧ для "традиционного" двухкомпонентного. Результаты измерений позволяют сделать вывод об увеличении эффективности преобразования энергии волн накачки при применении многокомпонентного сигнала с жесткой фазовой связью между частотными составляющими. Это можно объяснить тем, что многокомпонентный сигнал, представляющий собой последовательность спектральных составляющих, которые отличаются между собой на очень малую величину циклической ВРЧ в ближней зоне ЭАП 10, можно рассматривать как синфазно распространяющиеся колебания при условии  $\Omega / \omega_m \ll 1$ .

Синфазность распространения взаимодействующих волн накачки эквивалентна приросту плотности энергии в области коллинеарного распространения, следовательно, приводит к росту амплитуды ВРЧ, причем пропорционально числу спектральных компонент. В области ближнего поля ЭАП 10 основная перекачка энергии происходит на нижнюю частоту  $F_- = 16.5$  кГц (длина волны в водной среде  $\Lambda = 0.091$  м). В то же время в спектре разностного сигнала присутствуют составляющие с частотами, кратными  $F_- = 16.5$  кГц, т.к. идет одновременно взаимодействие



**Рис. 3.** Данные для УЗ-полей ВРЧ  $F_- = 16.5$  кГц (0.091 м),  $2F_- = 33$  кГц (0.045 м),  $3F_- = 49.5$  кГц (0.03 м),  $4F_- = 66$  кГц (0.023 м),  $5F_- = 82.5$  кГц (0.018 м) в дальней зоне ПИА. Левая вертикальная ось — угловая ширина лепестка излучения ХН на уровне 0.7; правая вертикальная ось — уровень звукового давления

линии и соседних ВЧ-спектральных составляющих сигнала накачки, т.е. формируются гармоники ВРЧ с частотами (длинами волн в воде)  $2F_- = 33$  кГц (0.045 м),  $3F_- = 49.5$  кГц (0.03 м),  $4F_- = 66$  кГц (0.023 м) и  $5F_- = 82.5$  кГц (0.018 м) для шестикомпонентного сигнала накачки. Распределения амплитуд звукового давления высших гармоник ВРЧ на акустической оси ЭАП 10 имеют вид, аналогичный друг другу. Их особенность — достижение практически одинаковых уровней в дальней зоне ЭАП 10 (рис. 3). Установлено, что в дальней зоне ЭАП 10 (дальность около  $7l_d$ ) уровни амплитуд для всех компонент ВРЧ-

гармоник практически равны и составляют около 30 дБ относительно 1 Па. Это является особенностью формирования ПИА с многокомпонентной накачкой, т.к. для "традиционной" двухкомпонентной ПИА отмечают снижение уровня генерации низкочастотной компоненты с уменьшением значения ее частоты (увеличением значения ее длины волны). Так, уровень звукового давления первой гармоники ВРЧ  $F_- = 16.5$  кГц многокомпонентного сигнала превышает уровень ВРЧ "традиционного" на 12–15 дБ в ближней зоне и приближается к 6 дБ в дальней при постоянной средней мощности накачки. Угловые распределения амплитуд звуковых давлений для всех компонент

ВРЧ-гармоники идентичны друг другу — боковое излучение практически отсутствует, а угловая ширина по уровню 0.7 около  $2^\circ$  ( $\sim 1.8^\circ$  для 16.5 кГц и  $2.3^\circ$  для 82.5 кГц). Таким образом, в результате нелинейного взаимодействия многокомпонентного сигнала накачки формируется широкополосный многокомпонентный сигнал ВРЧ. Угловые распределения уровней звуковых давлений для данных спектральных составляющих соответствуют известным зависимостям — узкий основной лепесток ХН без бокового поля в широкой полосе частот (диапазоне длин волн в водной среде).

### Эксперименты с моделями

Морская поверхность является подвижной, неровной и "акустически мягкой" границей раздела двух сред, для которых плотности  $\rho$  и скорости  $c$  распространения УЗ изменяются скачкообразно. Отдельные элементарные УЗ-волны, отраженные от точек неровной поверхности, суммируясь в точке сложения, образуют отраженное УЗ-поле, характер которого будет зависеть от разности фаз  $\Delta\varphi = 4\pi(h/\Lambda)\sin\chi$  элементарных волн, одновременно пришедших в точку наблюдения ( $h$  — высота неровностей на этой поверхности,  $\Lambda$  — длина ВРЧ в водной среде,  $\chi$  — угол скольжения, отсчитываемый от поверхности). В этой связи переизлучаемое неровной поверхностью воды УЗ-поле состоит из двух компонент — регулярной (когерентной), формирующей отраженную ВРЧ (вблизи зеркального направления), и случайной (некогерентной), образующей рассеянное поле ВРЧ (в нижней полусфере). Соотношение регулярной и случайной компонент переизлученного поля зависит от степени неровности поверхности моря, причем данный параметр неровности поверхности характеризуется соразмерностью длины ВРЧ  $\Lambda$  и расстояния  $h \leq \Lambda/4$  от "вершин" и "подов" бегущей поверхностной волны. Условие, при котором отражающая поверхность может считаться акустически ровной, т.е. отражающей зеркально, выражается соотношением [13]:

$$h/\Lambda \leq 1/(8 \sin \chi). \quad (3)$$

Рассмотренная выше особенность сформированного широкополосного излучения ВРЧ позволяет сделать важный вывод: "бестелесная" ПИА может быть использована как инструмент для косвенной оценки степени неровности поверхности моря. Так, например, для заданной величины угла скольжения  $\chi$  можно изменять значение длины ВРЧ  $\Lambda$  при облучении неровной поверхности вплоть до регистрации превалирования в эхосигнале регулярной (когерентной) отраженной ВРЧ вблизи зеркального направления, что и позволит

косвенно оценить высоту  $h$  неровностей на этой границе раздела.

В качестве реализации ПИА с многокомпонентной накачкой в данном измерительном режиме можно использовать большой мозаичный ЭАП, имеющий диаметр 182 см и состоящий из 364 пьезоэлементов прямоугольной формы ( $4.8 \times 6.4$ ) см, которые распределены по его плоской поверхности в виде 13 концентрических колец [14]. Для параметрической генерации ВРЧ в диапазоне (0.5 ÷ 5) кГц мозаичный ЭАП излучает УЗ-волны накачки средней мощности в частотном диапазоне (11 ÷ 16) кГц. Измерения производились на расстояниях до 150 м, длина ближней зоны  $l_d \approx 25.4$  м (эффективные радиусы однородных поршневых источников:  $a_1 = 0.87$  м на  $f_1 = 16$  кГц,  $a_2 = 0.83$  м на  $f_2 = 11$  кГц). В [13] представлены осевые и угловые распределения формирующихся амплитуд звукового давления сигналов суммарной ( $f_+ = 27$  кГц) и разностной ( $F_- = 5$  кГц) частот, нормированных к величине  $(P_{01} \times P_{02} \times A_1 \times A_2)$ . Здесь:  $P_{01} \times P_{02} \approx 2.513817 \times 10^8$  Па<sup>2</sup> — произведение амплитуд звукового давления исходных сигналов накачки у поверхности поршневого ЭАП;  $A_{1,2}$  — площади излучающих поверхностей ЭАП на каждой из исходных частот  $f_1 = 16$  кГц,  $f_2 = 11$  кГц. Отметим, что для расстояний 100 м амплитуды звукового давления на суммарной ( $f_+ = 27$  кГц) и разностной ( $F_- = 5$  кГц) частотах составляют  $\sim 8\%$  и  $0.6\%$  от амплитуды звукового давления исходной волны накачки соответственно.

Рассмотрим применение описанного выше подхода для модернизации режима ПИА многокомпонентной накачки при использовании большого мозаичного ЭАП [14]. Если принять центральную частоту накачки 13.5 кГц = (11 кГц + 16 кГц)/2 и величину шага изменения значения разностной частоты  $F_- = 0.25$  кГц, можно сформировать семь фазовязанных компонент накачки с частотами 12.75, 13, 13.25, 13.5, 13.75, 14, 14.25 кГц. Данный режим функционирования ПИА позволит в водной среде генерировать гармоники ВРЧ с частотами (длинами волн в воде)  $F_- = 0.25$  кГц (6 м),  $2F_- = 0.5$  кГц (3 м),  $3F_- = 0.75$  кГц (2 м),  $4F_- = 1$  кГц (1.5 м),  $5F_- = 1.25$  кГц (1.2 м) и  $6F_- = 1.5$  кГц (1 м). Проведем оценочный расчет высоты  $h$  неровностей на границе раздела в соответствии с (3) для двух крайних значений диапазонов — углов скольжения  $\chi = 10^\circ$  и  $40^\circ$  и гармоник  $F_- = 0.25$  кГц (6 м) и  $6F_- = 1.5$  кГц (1 м). Итак, критерий акустической ровности взволнованной поверх-

ности моря (3) дает следующие цифры: измерения на первой гармонике ВРЧ  $F_{\text{н}} = 0.25$  кГц (6 м) при углах скольжения  $\chi = 10^\circ$  и  $40^\circ$  обеспечат оценку высот неровностей  $h \leq 4.3$  м и 1.2 м соответственно, а измерения на шестой гармонике ВРЧ  $6F_{\text{н}} = 1.5$  кГц (1 м) при углах скольжения  $\chi = 10^\circ$  и  $40^\circ$  — оценку высот неровностей  $h \leq 0.72$  м и 0.2 м соответственно.

## ВЫВОДЫ

Гидроакустическая аппаратура с ПИА в режиме многокомпонентной накачки применяется при решении "традиционных" задач гидроакустического мониторинга водоемов, в частности при профилировании и эхолотировании дна и придонных слоев, оконтуривании иловых выбросов предприятий и определении толщины их слоев и т.д. Между тем особенности формирования широкополосного излучения ВРЧ позволяют использовать "бестелесную" ПИА в новом качестве — как инструмент для косвенной оценки степени неровности поверхности моря при проведении измерений гидроусловий на прибрежной акватории. В данных случаях актуально применение гидроакустических сигналов диапазона десятков–сотни герц, формируемых ПИА с повышенной эффективностью генерации ВРЧ. Следует отметить, что применение принципов нелинейной акустики позволяет упростить методики измерений, в частности неизменность направленных свойств основного лепестка в широкой полосе ВРЧ обеспечивает повышение точности и качество проводимых измерений [15–17].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заграй Н.П. Нелинейные взаимодействия в слоистых и неоднородных средах. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 433 с.
2. Ruffa A.A. High efficiency parametric sonar. Patent No. US 6704247B1. 09.03.2004. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6704247B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20040309&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6704247B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20040309&DB=&locale=en_EP)
3. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
4. Infrasonic wave directional emission system and method based on phase-controlled parametric array. Патент КНР CN 113630687 A. 09.11.2021. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=CN&NR=113630687A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20211109&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=CN&NR=113630687A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20211109&DB=&locale=en_EP)
5. Ruffa A.A. Multiple frequency parametric sonar. Patent US 9523770B1. 20.12.2016. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=9523770B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20161220&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=9523770B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20161220&DB=&locale=en_EP)
6. Parametric transmission for echo sounding and underwater communications involves maximising electroacoustic efficiency of transmission using switched power amplifiers. Patent DE 19931387A1. 01.02.2001. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=DE&NR=19931387A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20010201&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=DE&NR=19931387A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20010201&DB=&locale=en_EP)
7. 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.
8. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 400 с.
9. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование / Пер. с англ. под ред. А.С. Галина. М.: Связь, 1979. 384 с.
10. Voloshchenko V.Yu. et al. Method and Device for Increasing the Efficiency of an Emitting Antenna. Patent US 2022/0123842A1. 21.04.2022. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2022123842A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20220421&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=2022123842A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20220421&DB=&locale=en_EP)
11. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. М.: Сов. Энциклопедия, 1979. 400 с.
12. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
13. Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика и рыбо-локация. М.: Пищ. пром-сть, 1978. 312 с.
14. Garrett G.S., Tjotta J.N., Tjotta S. Nearfield of a large acoustic transducer. Pt. 2. Parametric radiation // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. Vol. 74, iss. 3. P. 1013–1020. DOI: 10.1121/1.389933
15. Волощенко Е.В., Тарасов С.П. и др. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения. Патент РФ № RU 2721307C1. 18.05.2020. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1\\_20200518](https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1_20200518)
16. 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](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)



17. Волощенко В.Ю., Волощенко Е.В. Многочастотный доплеровский способ измерений скорости течений в водной среде. Патент РФ № RU 2795579C1. 05.05.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru>

Контакты: Волощенко Елизавета Вадимовна, [voloshchenko.liza@mail.ru](mailto:voloshchenko.liza@mail.ru)

Южный федеральный университет, Таганрог

Материал поступил в редакцию 03.03.2024

## THE MULTI-COMPONENT PUMP SIGNAL'S PARAMETRIC TRANSMITTING ANTENNA FOR SHALLOW WATER HYDROACOUSTIC MONITORING

E. V. Voloshchenko

*Southern Federal University, Taganrog, Russia*

The possibility of the operational characteristics changing for the multicomponent pump signal's parametric transmitting array (PTA), in particular, to increase the energy potential of the emerging low-frequency signals of multiple frequencies with a constant width of the main lobe of the directivity pattern (DP), is considered. This is achieved by using phased spectral components located in the passband of the emitting electroacoustic transducer as a pumping signal, and the difference in their frequencies determines the composition of the polyharmonic low-frequency signal generated in the aquatic medium. This method of generating PTA makes it possible to increase the efficiency of generating probe signals, specifically in the long-wavelength range, which is important when measuring the parameters of the movement of a layered marine medium. Features of the formation for the difference frequency wave's (DFW) broadband radiation allow the use of "virtual" PTA in a new ability — as a tool for indirect estimation of the sea surface's roughness degree for the sea surface when measuring hydroconditions in coastal waters.

*Keywords:* parametric transmitting array, hydroacoustic monitoring

### REFERENCES

- Zagrai N.P. *Nelineinye vzaimodeistviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh* [Nonlinear interactions in layered and inhomogeneous media]. Taganrog, TRTU Publ., 1998. 433 p. (In Russ.).
- Ruffa A.A. *High efficiency parametric sonar. Patent US no. US 6704247B1*. Prioritet 09.03.2004. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6704247B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20040309&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6704247B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20040309&DB=&locale=en_EP)
- Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I. *Nelineinaya gidroakustika* [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).
- Infrasonic wave directional emission system and method based on phase-controlled parametric array. Patent CN 113630687 A*. Prioritet 09.11.2021. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=CN&NR=113630687A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20211109&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=CN&NR=113630687A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20211109&DB=&locale=en_EP)
- Ruffa A.A. *Multiple frequency parametric sonar. Patent US 9523770B1*. 20.12.2016. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=9523770B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20161220&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=9523770B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20161220&DB=&locale=en_EP)
- Parametric transmission for echo sounding and underwater communications involves maximising electroacoustic*

- efficiency of transmission using switched power amplifiers. Patent DE 19931387A1. 01.02.2001. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/origin?CC=DE&NR=19931387A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20010201&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/origin?CC=DE&NR=19931387A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20010201&DB=&locale=en_EP)*
7. Myuir T.Dzh. [Nonlinear acoustics and its role in marine sediment geophysics]. Yu.Yu. Zhitkovskii, editor. *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics of marine sediments], translate from eng., Moscow, Mir Publ., 1977, pp. 227–273. (In Russ.).
  8. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. *Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy* [Hydro-acoustic parametric systems]. Rostov-on-Don, Rostizdat Publ., 2004. 400 p. (In Russ.).
  9. Manassewitsch V. *Frequency Synthesizers: Theory and Design*. (Russ ed.: Manassevich V. *Sintezatory chastot. Teoriya i proektirovanie*. Translate and eds. A.S. Galin. Moscow, Svyaz' Publ., 1979. 384 p.).
  10. Voloshchenko V.Yu. et al. *Method and Device for Increasing the Efficiency of an Emitting Antenna. Patent US 2022/0123842A1. 21.04.2022. URL: [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/origin?CC=US&NR=2022123842A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20220421&DB=&locale=en\\_EP](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/origin?CC=US&NR=2022123842A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20220421&DB=&locale=en_EP)*
  11. Golyamin I.P., editor. *Ul'trazvuk. Malen'kaya ehntsiklopediya* [A little encyclopaedia]. Moscow: Sovetskaya Ehntsiklopediya Publ., 1979. 400 p. (In Russ.).
  12. Novikov B.K., Timoshenko V.I. *Parametricheskie anteny v gidrolokatsii* [Parametric antennas in sonar]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 256 p. (In Russ.).
  13. Kudryavtsev V.I. *Promyslovaya gidroakustika i rybolokatsiya* [Fishing hydroacoustics and fish locators]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1978. 312 p. (In Russ.).
  14. Garrett G.S., Tjotta J.N., Tjotta S. Nearfield of a large acoustic transducer. Pt. 2. Parametric radiation. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1983, vol. 74, iss. 3, pp. 1013–1020. DOI: 10.1121/1.389933
  15. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. et al. *Akusticheskiy sposob i ustroystvo izmereniya parametrov morskogo volneniya. Patent RF no. RU 2721307C1* [Acoustic method and device for measuring sea swell parameters]. Prioritet 18.05.2020. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1\\_20200518](https://yandex.ru/patents/doc/RU2721307C1_20200518)
  16. Voloshchenko E.V., Tarasov S.P. [Measurement of sea wave characteristics based on the application of nonlinear acoustic effects]. *Materialy 6 Vserossiiskoi konf. molodykh uchenykh i spetsialistov: "Akustika srede obitaniya (ASO-2021)"* [Proc. 6th All-Russ. Conf. for young sci. and spec. "Habitat Acoustics (ASO-2021)"], Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2021. P. 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](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)
  17. Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko E.V. *Mnogochastotnyi doplerovskii sposob izmerenii skorosti techenii v vodnoi srede. Patent RF no. RU 2795579C1* [Multi-frequency Doppler method of current velocity measurements in aquatic environment]. 05.05.2023. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2795579C1/ru>

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

Article received by the editorial office on 03.03.2024

## INTRODUCTION

One of the important engineering areas related to the progress of research methods and equipment for the development of the coastal shelf zone, is to consider the issue of the scattering of ultrasonic (US) signals by the sea surface. A current aspect of research in this area is the study of the possibilities of solving the inverse scattering problem — determining the parameters of the sea surface in a wide frequency band from the characteristics of the signals scattered by it. It should be noted that hydroacoustic interference antennas for directional radiation in the low-frequency range have significant weight and size characteristics, which complicate their use in practice. A possible solution for this technical problem is the use of a "virtual" parametric transmitting array (PTA), which operation is based on the nonlinear interaction of powerful ultrasonic waves with frequencies  $f_1, f_2$  that, propagating in the aquatic environment, form hydrodynamic disturbances of combination frequencies, in particular the difference frequency wave (DFW)  $F = |f_1 - f_2|$ .

## BRIEF OVERVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS

### General provisions

The nonlinear interaction noted above is a second-order effect of smallness, as a result of which the task of increasing the efficiency of converting the energy of pump waves into DFW is relevant. The spatial distribution of the DFW amplitudes depends on the characteristics of the aqueous medium — the nonlinear parameter  $\varepsilon$ , density  $\rho_0$ , the sound speed  $c_0$ , — the attenuation coefficients of the pump waves  $\alpha_{1,2}$  and the DFW  $\alpha_-$ , as well as the sound pressure amplitudes  $p_{01}, p_{02}$  of the pump waves with frequencies  $f_1, f_2$  of the electroacoustic transducer (EAT) near the surface, the EAT passband, i.e., values of the cyclic DFW  $\Omega = 2\pi|f_1 - f_2|$  and the diffraction distance  $l_{\text{д}}$  for pump waves. Increasing the efficiency of radiating PTA can be achieved in several ways:

1) changing the geometric parameters of the PTA interaction zone to increase the amplitudes of the sound pressure of the pump waves [1, pp. 36–55, 111–217];

2) filling the zone of nonlinear interaction of powerful ultrasonic waves with a solid or liquid intermediate medium, which has an increased value of the nonlinear parameter in combination with dispersion [2] in comparison with water;

3) selection of the type of modulation and the corresponding schemes for generating electrical signals

in the radiating path to excite the EAT, phasing of pump waves, and the use of focused ultrasonic beams in the interaction zone [3, 4].

The problem of increasing the efficiency of sonars with parametric radiating paths is highlighted in [5, 6]. Let us consider it in more detail [5].

### Critical analysis of the solution proposed in [5]

The purpose of the patent is to increase the efficiency of a location system with several (at least two) parametric emitting paths, in each of which a generator, a power amplifier, and a resonant pump EAT are connected in series. Each parametric path emits ultrasonic energy into the aquatic environment at several pump frequencies (two, three, four, five), which leads to the nonlinear generation of a set of difference frequency signals and, according to the authors, an increase in sonar efficiency. The same purpose is served by the use of one or more interference receiving antennas, the peculiarity of which is their execution in the form of a straight line on which hydrophones are located in a given manner. Let's discuss some points. As follows from [5, Figs. 1–4], each parametric emitting path has its "own" resonant pumping EAT (acoustic projector, AP), located at its "own" point in space, emitting its "own" pump signal, which differs in frequency. For example, from [5, Fig. 4], there are five pump signals: 1 (80 kHz), 2 (83 kHz), 3 (86 kHz), 4 (89 kHz), 5 (92 kHz), they "combine in pairs" the difference frequency waves (DFW): 1 – 2 (3 kHz), 1 – 3 (3 kHz), 1 – 4 (3 kHz), 1 – 5 (3 kHz), 2 – 3 (6 kHz), 2 – 4 (6 kHz), 2 – 5 (6 kHz), 3 – 4 (9 kHz), 3 – 5 (9 kHz), 4 – 5 (12 kHz).

The effectiveness of the nonlinear generation of individual DFW, for example 1 – 4 and 1 – 5, for which the EAT (AP) are spaced apart, is questionable, because "a parametric sound source is a volumetric antenna that radiates along the axis and occupies part of the space directly in front of the EAT" [7]. It is interesting to analyze the statement of the authors of the patent [5] that "an increase in the number of interactions of pump waves linearly increases the efficiency of a parametric sonar," and the rationale for this is as follows. If there are two pump signals at 80 kHz, 83 kHz, then there is only one DFW 3 kHz with a generation efficiency of 1%. Further, if there are three pump signals 80 kHz, 83 kHz, 86 kHz, then we have three DFW 3 kHz, 3 kHz and 6 kHz with a generation efficiency of 1% each, i.e., in general 3%, etc. And for five pump signals (see [5, Fig. 4], the set of higher frequencies), the generation efficiency is 12%! Thus, the "principle of energy addition of signals" has been proposed, i.e., the corpuscular approach prevails, considering the wave nature of the DFW. The phased (constructive interference — amplification) or anti-phase (destructive interference — attenuation) addi-

tion of coherent signals — DFW components with multiple frequencies is not considered.

**Critical analysis of the solution proposed in [8]**

The use of a three-component (amplitude-modulated) pump wave to increase the PTA efficiency was proposed in [8]. The radiating path of the device implementing this method contains generators of electrical oscillations of high frequency  $f$  and modulation frequency  $F$ , the outputs of which are connected through an amplitude modulator to a pulse modulator, controlled by a pulse generator. Next, the electrical signal is fed through a power amplifier, a notch filter to the EAT pump, the piezoelectric element of which oscillates at the main thickness mode (resonant frequency  $f_0$ ) as one-sided piston radiation into the aquatic environment. As a result, the piezoelectric element is provided with a mode of one-way transmission of vibrations into the location medium. This causes the propagation of ultrasonic pump waves with cyclic frequencies

$$\omega_1 = 2\pi(f_0 - F) < \omega_0 = 2\pi f_0 < \omega_2 = 2\pi(f_0 + F)$$

(carrier frequency and two side spectral components) and wave vectors  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_0, \mathbf{k}_2$ . Thus, in the location environment, a general spatial region of collinear propagation and nonlinear interaction of intense ultrasonic pump waves with both the carrier frequency and each of the side spectral components is formed, including both near and far zones of the formed PTA. The harmonic one-tone amplitude modulation signal has the form

$$U = U_m \cos 2\pi ft + \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi(f + F)t + \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi(f - F)t, \quad (1)$$

where  $U$  and  $U_m$  are the instantaneous and amplitude values of the electrical signal,  $m$  is the modulation coefficient, the maximum possible value of the side spectral components at  $0 \leq m \leq 1$  is equal to  $U_m / 2$ , and the phases are symmetrical relative to the phase of the carrier oscillation,  $f$  is the carrier frequency,  $F$  is modulation frequency,  $(f_1 + f_2) / 2 = f_0$ .

The parametric radiation mode (RPM) in the event of such a generating method allows one to form the amplitude of the sound pressure of the first low frequency—the DFW harmonic that is 3 dB larger than due to the use of any other generating scheme.

However, the considered method for increasing the efficiency of PTA has a number of disadvantages:

1) the passband of the electronic path and the EAT must be equal to twice the frequency of the modulat-

ing oscillation. This obstacle complicates the implementation of electronic generating circuits and designing the antenna system;

2) the efficiency of the PTA is reduced due to the “parasitic” generation of the second low-frequency harmonic of the DFW with a frequency  $2F$ , which amplitude differs only by a factor  $m / 2$  from the amplitude of the first harmonic of the DFW at one hundred percent modulation ( $m = 1$ ),

3) the main lobe of the PTA in the “saturation” mode significantly expands and distorts: the shape of the directivity pattern (DP) becomes amplitude-dependent, and a dip appears in the radiation level on the acoustic axis of the PTA.

**FORMULATION OF THE PROBLEM**

The relevance of research on the characteristics of PTA with increased energy potential necessitated the selection of an acceptable scheme for generating an electrical pump signal containing a given number of phase-related components, which was carried out using [9].

The emitting path of the PTA with an  $N$ -component pump signal [10] (Fig. 1) contains a reference oscillator 1, the first output of which is connected through the delayed pulse generator 2 to the second inputs of coincidence circuits 3. The outputs of coincidence circuits 3 and the second output of reference oscillator 1 through frequency dividers 4 are connected to the  $N$  signal inputs (Fig. 1) of analog switch 5.

Series-connected coincidence circuits 3 and frequency dividers 4 with the same division coefficient form  $(N - 1)$  parallel-connected links. The connections of the first inputs of coincidence circuits 3 in parallel-connected links are made based on the fact that in each link the frequency of the reference oscillator 1 should be reduced.

**Fig. 1.** Block diagram of the device for implementing the method [10]

1 — reference oscillator; 2 — delayed pulse generator; 3 — coincidence circuit,  $(N - 1)$  units; 4 — frequency divider,  $N$  units; 5 — analog switch; 6 — adder; 7 — amplitude modulator; 8 — pulse generator; 9 — power amplifier; 10 — EAT input; 11 — control and adjustment unit.  
 $U1, U2, U5$  — electrical signals;  $U3$  —  $(N - 1)$  signal lines;  $U4$  —  $N$  signal lines

The generated oscillations  $U4$  (a group of  $N$  signals) with the same amplitude and initial phase (at the moment of time  $t = 0$ ) arrive at the signal inputs of the analog switch 5. The control input of the analog

key 5 is connected to the second output of the control unit 11, the first and third outputs of the latter are connected to the control inputs of both the reference generator 1 and the pulse generator 8. Analog switch 5 through the adder 6, amplitude modulator 7, power amplifier 9 is connected to the input of the EAT 10. The amplitude modulator 7 operating mode is set by pulse generator 8. The control outputs of the control and adjustment unit 11 are connected to the control inputs of analog switch 5, reference generator 1 and pulse generator 8, allowing one to select a pulse or continuous operating mode of the PTA.

The operation of the device implementing a method for controlling the efficiency of DFW generation [10] due to the radiation of a multicomponent phase-related pump signal into the aquatic environment occurs as follows. To generate the required number of pump signal components, the operator, through the control and adjustment unit 11, starts the reference oscillator 1, which produces an electrical signal  $U1$  in the form of a continuous sequence of pulses with a frequency  $f_0$  at a given polarity and phase relationships. The signal  $U1$  is supplied directly to the inputs of both the delayed pulse generator 2 and the frequency divider 4, and from the output of the latter as a signal  $U4$  to one of the inputs of the analog switch 5. The electrical signal is supplied to the first input of coincidence circuit 3, while the second input of coincidence circuit 3 receives an electrical signal  $U2$  from the output of delayed pulse generator 2. The first inputs of all other coincidence circuits 3 receive  $U3$  signals from the previous in the hierarchy parallel line (see Fig. 1). At the output of coincidence circuit 3, a sequence of pulses with cut periods (from one to several at the outputs of different coincidence circuits 3) is formed. If we denote the number of pulses of the reference oscillator 1, that can fit in the cutting period, by the number  $m$ , and the number of cut out pulses — by the number  $k$ , then the frequency of the desired spectrum will be related as follows:

$$F_k = [(m - k) / m] \cdot F_0,$$

$F_0 = f_0 / 2^n$ , where  $f_0$  is the frequency of the reference oscillator,  $2^n$  is the division coefficient,  $n$  is the number of divisions by 2. In this scheme, the spectrum step of the multicomponent pump signal, or "difference" frequency, is defined as  $F_- = F_0 / m$ .

With the appropriate operator command received through the control and adjustment unit 11 to the control input of the analog switch 5, the number of spectral components required to form a given version of the multicomponent excitation signal is set. The electrical multicomponent excitation signal generated at the output of adder 6 is the sum  $N$  of oscillations and has the form

$$S(t) = \sum_{v=0}^{N-1} \sin(\omega_1 + v\Omega)t = N \left[ \sin\left(\frac{N\Omega t}{2}\right) / N \sin\left(\frac{\Omega t}{2}\right) \right] \sin \omega_m t, \quad (2)$$

where  $\omega_m = \omega_1 + (N - 1)\Omega / 2$  is the average frequency. At the moment of time  $t = 0$  all oscillations are in the same phase; over time, due to the difference in their frequencies, and addition, a system of maxima is formed, and the first zero is obtained at time  $t$ , determined from the equality  $(N\Omega t / 2) = \pi$ , so  $t = 2\pi / (N\Omega) = 1 / (NF_-)$ . The zeros of the denominator set the main maximum, the beat period is determined by the number of main maxima per unit time, i.e., zero values of the denominator  $(\Omega t / 2) = \pi \cdot n$ , where  $n = 0, 1, 2, \dots$ . So  $t = n / F_-$ ;  $\Delta t = 1 / F_-$ .

Fig. 2 schematically shows the spectrum of a multicomponent pump signal (at  $N = 5$ ). It can be seen that, in the passband of the piezoelectric element (dashed line) of EAT 10, there are five spectral components of the pump signal (solid lines) with frequencies  $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 + 2\Omega, \omega_0 + 3\Omega, \omega_0 + 4\Omega$ , each is spaced on the frequency axis by the value of the cyclic DFW  $\Omega$ . From the output of the adder 6 (Fig. 1), the multicomponent pump signal is supplied to the pulse modulator 7, the control input of which is connected to the additional output of the pulse generator 8. Next, the signal after the power amplifier 9 is supplied to the piezoelectric element EAT 10. The piezoelement can have the form of, for example, a rod of resonant size  $l_{CT} = c_{CT} / 2f$ , where  $c_{CT}$  is the speed of sound in the rod,  $f$  is the resonant frequency of its oscillations [11], the half-wave piezoelectric element oscillates due to its piezoelectric properties. These vibrations are transmitted to the aqueous medium, which has nonlinear elastic properties, and propagate as pulses  $U5$  containing condensations and rarefactions of the medium.

**Fig. 2.** Spectrum of a multicomponent ( $N = 5$ ) pump signal in the passband of the EAT piezoelectric element [10]

In an extended section of the medium, including the near and far zones of EAT 10, a spatial region of collinear propagation and nonlinear interaction of intense pump components with frequencies  $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 + 2\Omega, \omega_0 + 3\Omega, \omega_0 + 4\Omega$  is formed. A multicomponent pump signal  $U5$  is a sum of phased spectral components, the frequencies of which differ from each other by a small amount of cyclic DFW  $\Omega$ . Due to the quadratic nonlinearity of the propagation medium and when performing spatio-temporal

matching of intense pump components, in the PTA, spectral components of the combinational DFW are generated — DFW harmonics  $\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ . The first harmonic of the DFW  $\Omega$  is generated by the largest number of spectral components from the multi-component pump signal. For example, with five-component pumping, its sources are formed from four pairs of nonlinear interactions of components 1 – 2, 2 – 3, 3 – 4, 4 – 5; for the second harmonic of the DFW  $2\Omega$  — from three pairs of nonlinear interactions of components 1 – 3, 3 – 5, 2 – 4, etc. Thus, for PTA, an increase in the efficiency of generation of spectral components of combinational DFW, i.e., DFW harmonics  $\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ , ..., is the most significant for low-frequency  $\Omega$ , i.e., the first harmonica. The operator, using a command through the control and settings unit 11, commutes the analog switch 5, ensuring that the required number of used spectral components in a given implementation of the multicomponent pump signal arrives at the input of the adder 6.

## IMPLEMENTATION OF THE PROPOSED APPROACH

### Experimental characteristics

The advantages of the proposed method for forming PTA are confirmed by model experimental studies performed in laboratory conditions. We used EAT 10 with a round flat piezoelectric element, a diameter of 20 mm, a resonant frequency of 1.98 MHz (near zone length  $\sim 0.15$  m) and a passband of 200 kHz, which made it possible to use from two up to six spectral components (phase-related components sequentially spaced from each other by  $F_- = 16.5$  kHz, Fig. 2) when forming a multicomponent pump signal [12]. As expected, an increase in the number  $N$  (from 2 to 6) of phase-related spectral components used in a multicomponent pump signal causes a dynamic increase in DFW generation (at  $N = 3$  and 4), while a further increase in the number of components (to 5 and 6 in the pump signal) causes saturation of the growth dynamics. The DFW sound pressure level  $F_- = 16.5$  kHz on the EAT 10 axis for a six-component signal is  $\sim 5$  dB higher than the DFW sound pressure level for a "traditional" two-component signal. The measurement results allow us to conclude that the efficiency of conversion of pump waves' energy increases when using a multicomponent signal with a rigid phase coupling between the frequency components. This can be explained by the fact that a multicomponent signal, which is a sequence of spectral components that differ from each other by a very small amount of cyclic DFW in the near zone of the EAT 10, can be considered an in-phase propagating oscillations under the condition  $\Omega / \omega_m \ll 1$ .

The in-phase propagation of interacting pump waves is equivalent to an increase in energy density in the region of collinear propagation; therefore, it leads to an increase in the DFW amplitude, which is proportional to the number of spectral components. In the near-field region of EAT 10, the main energy transfer occurs at the lower frequency  $F_- = 16.5$  kHz (wavelength in the aquatic environment  $\Lambda = 0.091$  m). Meanwhile, the spectrum of the difference signal contains components with frequencies that are multiples of  $F_- = 16.5$  kHz, because there is a simultaneous interaction of lines and neighboring HF-spectral components of the pump signal, i.e., DFW harmonics with frequencies (wavelengths in water) are formed:  $2F_- = 33$  kHz (0.045 m),  $3F_- = 49.5$  kHz (0.03 m),  $4F_- = 66$  kHz (0.023 m) and  $5F_- = 82.5$  kHz (0.018 m) for a six-component pump signal. The distributions of the sound pressure amplitudes of the higher harmonics of the DFW on the acoustic axis of the EAT 10 have a form similar to each other. Their peculiarity is the achievement of almost identical levels in the far zone of EAT 10 (Fig. 3).

**Fig. 3** Data for ultrasonic fields of DFW  $F_- = 16.5$  kHz (0.091 m),  $2F_- = 33$  kHz (0.045 m),  $3F_- = 49.5$  kHz (0.03 m),  $4F_- = 66$  kHz (0.023 m),  $5F_- = 82.5$  kHz (0.018 m) in the far zone of the PTA. The left vertical axis is the angular width of the DP radiation lobe at a level of 0.7; right vertical axis — sound pressure level

It has been established that in the far zone of EAT 10 (range about  $7l_{\text{д}}$ ) the amplitude levels for all components of the DFW harmonics are almost equal and amount to about 30 dB relative to 1 Pa. This is a feature of the formation of PTA with multicomponent pumping, because for the "traditional" two-component PTA, a decrease in the level of generation of the low-frequency component is noted in the event of a decrease in the value of its frequency (increase in the value of its wavelength). Thus, the sound pressure level of the first harmonic of the DFW  $F_- = 16.5$  kHz of a multicomponent signal exceeds the level of the "traditional" DFW by 12–15 dB in the near zone and approaches 6 dB in the far zone at a constant average pump power. The angular distributions of sound pressure amplitudes for all components of DFW harmonics are identical to each other: there is practically no lateral radiation, and the angular width at level 0.7 is about  $2^\circ$  ( $\sim 1.8^\circ$  for 16.5 kHz and  $2.3^\circ$  for 82.5 kHz). Thus, as a result of the nonlinear interaction of the multicomponent pump signal, a wide-band multicomponent DFW signal forms. The angular distributions of sound pressure levels for these spec-

tral components correspond to the known dependencies — a narrow main lobe of DP without a side field in a wide frequency band (wavelength range in an aquatic environment).

### Experimenting with models

The sea surface is a moving, uneven, and “acoustically soft” interface between two media, for which the densities  $\rho$  and the speed  $c$  of ultrasound propagation change abruptly. Individual elementary ultrasonic waves reflected from points on an uneven surface and summed up at the point of addition, form a reflected ultrasonic field, the nature of which depends on the phase difference  $\Delta\varphi = 4\pi(h/\Lambda)\sin\chi$  of the elementary waves that simultaneously arrived at the observation point ( $h$  is the height of the irregularities on this surface,  $\Lambda$  is the length of the DFW in the aquatic environment,  $\chi$  is the grazing angle measured from the surface). In this regard, the ultrasonic field re-emitted by an uneven surface of water consists of two components — regular (coherent), forming a reflected DFW (near the mirror direction), and random (incoherent), forming a scattered DFW field (in the lower hemisphere). The ratio of the regular and random components of the re-emitted field depends on the degree of unevenness of the sea surface, and this parameter of the uneven surface is characterized by the proportionality of the length of the DFW  $\Lambda$  and the distance  $h \leq \Lambda/4$  from the "tops" and "bottoms" of the traveling surface wave. The condition under which a reflective surface can be considered acoustically smooth, i.e., reflecting specularly, is expressed by the relation [13]:

$$h/\Lambda \leq 1/(8 \sin \chi). \quad (3)$$

The above-considered feature of the generated broadband DFW radiation allows us to draw an important conclusion: "virtual" PTA can be used as a tool for indirectly assessing the degree of roughness of the sea surface. So, for example, for a given value of the grazing angle  $\chi$ , you can change the value of the length of the DFW  $\Lambda$  when irradiating an uneven surface until the echo signal indicates the prevalence of the regular (coherent) reflected DFW near the mirror direction. It allows one to indirectly estimate the height  $h$  of asperities at this interface.

As an example of the implementation of PTA with multicomponent pumping in this measuring mode, one can use a large mosaic EAT with a diameter of 182 cm and consisting of 364 rectangular piezoelements (4.8 × 6.4) cm, they are distributed over its flat surface in the form of 13 concentric rings [14]. For parametric generation of DFW in the range (0.5 ÷ 5) kHz, the mosaic EAT emits ultrasonic pump waves of average power in the frequency range (11 ÷

16) kHz. Measurements were made at distances of up to 150 m, the length of the near zone was  $l_{\text{д}} \approx 25.4$  m (effective radii of homogeneous piston sources:  $a_1 = 0.87$  m at  $f_1 = 16$  kHz, 0.83 m at 11 kHz). [13] presents axial and angular distributions of the resulting amplitudes of sound pressure signals at the total ( $f_+ = 27$  kHz) and difference ( $F_- = 5$  kHz) frequencies, normalized to the value ( $P_{01} \times P_{02} \times A_1 \times A_2$ ). Here:  $P_{01} \times P_{02} \approx 2.513817 \times 10^8 \text{ Pa}^2$  is the product of the sound pressure amplitudes of the initial pumping signals at the surface of the piston EAT;  $A_{1,2}$  — areas of the EAT radiating surfaces at each of the initial frequencies  $f_1 = 16$  kHz,  $f_2 = 11$  kHz. Note that for distances of 100 m, the sound pressure amplitudes at the total ( $f_+ = 27$  kHz) and difference ( $F_- = 5$  kHz) frequencies are ~ 8% and 0.6% of the sound pressure amplitude of the initial pump wave, respectively.

Let us consider the application of the approach described above to modernize the PTA mode of multicomponent pumping using a large mosaic EAT [14]. If we take the central pump frequency of 13.5 kHz = (11 kHz + 16 kHz)/2 and the value step for changing the difference frequency  $F_- = 0.25$  kHz, it is possible to form seven phase-related pump components with frequencies of 12.75, 13, 13.25, 13.5, 13.75, 14, 14.25 kHz. In the aquatic environment, this mode of operation of the PTA allows generating DFW harmonics with frequencies (wavelengths in water)  $F_- = 0.25$  kHz (6 m),  $2F_- = 0.5$  kHz (3 m),  $3F_- = 0.75$  kHz (2 m),  $4F_- = 1$  kHz (1.5 m),  $5F_- = 1.25$  kHz (1.2 m) and  $6F_- = 1.5$  kHz (1 m). Let us carry out an estimate calculation of the height  $h$  of irregularities at the interface in accordance with (3) for two extreme values of the ranges — grazing angles  $\chi = 10^\circ$  and  $40^\circ$  and harmonics  $F_- = 0.25$  kHz (6 m) and  $6F_- = 1.5$  kHz (1 m). So, the criterion for the acoustic flatness of the rough sea surface (3) gives the following figures: measurements at the first DFW harmonic  $F_- = 0.25$  kHz (6 m) with grazing angles  $\chi = 10^\circ$  and  $40^\circ$  provide an estimate of the roughness heights  $h \leq 4.3$  m and 1.2 m, respectively, and measurements at the sixth DFW harmonic  $6F_- = 1.5$  kHz (1 m) with grazing angles  $\chi = 10^\circ$  and  $40^\circ$  provide an estimate of the roughness heights  $h \leq 0.72$  m and 0.2 m respectively.

### CONCLUSIONS

Hydroacoustic equipment with PTA in multicomponent pumping mode is used for solving "traditional" problems of hydroacoustic monitoring of water bo-

dies, in particular for profiling and echo sounding the bottom and near-bottom layers, delineating sewage sludge from enterprises and determining the thickness of its layers, etc. Meanwhile, the peculiarities of the formation of broadband DFW radiation allow the use of "virtual" PTA in a new capacity as a tool for indirectly assessing the degree of roughness of the sea surface when measuring hydroconditions in coastal waters. In these cases, it is relevant to use hydroacous-

tic signals in the range of tens to hundreds of hertz, generated by PTA with increased efficiency of DFW generation. It should be noted that the application of the principles of nonlinear acoustics makes it possible to simplify measurement techniques; in particular, the invariance of the directional properties of the main lobe in a wide DFW band ensures increased accuracy and quality of measurements [15–17].