

15. Zagray N.P., Golosov S.P. Pole parametricheskogo izluchatelya pri izmenenii formy oblasti vzaimodeystviya [The field of the parametric radiator when changing the shape of the interaction region], *V kn. "Prikladnaya akustika"* [In the book "Applied acoustics"]. Taganrog: TRTI, 1985, Issue XI, pp. 32-36.
16. Zagray N.P., Golosov S.P. Vliyanie formy oblasti nelineynogo vzaimodeystviya na pole parametricheskoy anteny [Influence of the shape of the nonlinear interaction field on the field of parametric antenna], *Nauchno-tekhnicheskii sbornik: Sudostroitel'naya promyshlennost'. Seriya: Akustika, TSNII "Rumb"* [Scientific and technical collection: Shipbuilding industry. Series: Phonics, CRI "RUMB"], 1990, Issue 6, pp. 83-84.
17. Zagray N.P. Prostranstvennyy analiz i sintez signalov parametricheskoy anteny v srede s vertikal'nym raspredeleniem skorosti zvuka [Spatial analysis and synthesis of parametric antenna signals in a medium with a vertical distribution of sound velocity], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics], 1995, No. 4, pp. 18-21.
18. Zagray N.P. Nelineynye vzaimodeystviya v sloistykh i neodnorodnykh sredakh [The nonlinear interaction in layered and inhomogeneous media], under the ed. of academician AEN of the Russian Federation V.I. Timoshenko. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 433 p.
19. Sanches-Palensiya E. Neodnorodnye sredy i teoriya kolebaniy [Inhomogeneous media and the theory of oscillations]. Moscow: Mir, 1984, 472 p.
20. Zagray N.P., Pavlova M.N. Primenenie metoda pogruzheniya dlya resheniya zadach rasprostraneniya voln v neodnorodnoy sloistoy srede [Application of the immersion method for solving the problems of wave propagation in a heterogeneous layered medium], *NTK "Radio i volokonno-opticheskaya svyaz', lokatsiya i navigatsiya": Tezisy dokladov. Rossiya, Voronezh, 1997* [NTK "Radio and fiber-optic communication, location and navigation": Abstracts. Russia, Voronezh, 1997], Vol. 1, pp. 37-40.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Заграй Николай Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: znp@sfedu.ru; 347925, г. Таганрог, ул. К. Либкнехта, 193а; тел.: +78634379879; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Вишневецкий Вячеслав Юрьевич – e-mail: vuvishnevetsky@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

Zagray Nikolay Petrovitch – Southern Federal University; e-mail: znp@sfedu.ru; 193a, Libknechta Str., Taganrog, 347925, Russia; phone: +78634379879; the department of electrohydroacoustic and medical technology; dr.of eng. sc.; professor.

Vishnevetskiy Vyacheslav Yurievich – e-mail: vuvishnevetsky@sfedu.ru; 2, Shevchenko str., building E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroacoustic and medical technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 534.222.2

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-42-51

П.П. Пивнев

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНОВ

Одним из направлений океанических исследований является повышение эффективности средств освоения океана. Современные методы гидроакустики, могут быть более эффективными при построении аппаратуры на принципах использования сложных широкополосных сигналов. В статье приведен анализ принципов построения широкополосных гидроакустических систем мониторинга и поиска объектов в толще воды и дна. Перечислены основные виды

широкополосных сигналов. Заострено внимание на излучающих широкополосных антеннах. В работе сделан акцент на рассмотрении двух ключевых групп гидроакустических локаторов: параметрических широкополосных гидролокаторов и широкополосных гидролокаторов бокового обзора (ШП ГБО). Представлены преимущества параметрических широкополосных гидролокаторов и перечислены наиболее перспективные параметрические широкополосные системы, такие как: малогабаритные параметрические профилографы, параметрические сейсмопрофилографы, параметрические гидролокаторы бокового обзора (многолучевые параметрические профилографы), параметрические гидролокаторы траверзного обзора. Приведены некоторые основные энергетические характеристики параметрических антенн. Представлен один из способов увеличения скорости обзора пространства – способ частотного окрашивания среды. Обсуждаются особенности мониторинга мелководных районов с учетом дисперсии широкополосных сигналов. Рассмотрен случай построения широкополосных гидроакустических антенн гидролокаторов бокового обзора, состоящих из разночастотных преобразователей, механически связанных по полю. Приведены диаграммы направленности макета антенны широкополосного гидролокатора бокового обзора на частотах 77; 100; 127 и 155 кГц. Представлены особенности построения карт глубин с применением интерферометрических гидролокаторов бокового обзора. Приведены перспективы создания единой системы (базы данных) экологического наблюдения, в которую будут вноситься данные от широкополосных обзорно-поисковых систем для дальнейшей обработки и анализа.

Широкополосные гидроакустические системы; параметрический гидролокатор бокового обзора; широкополосный гидролокатор бокового обзора; траверзный обзор.

P.P. Pivnev

PECULIARITIES OF APPLICATION OF BROADBAND SONAR SYSTEMS FOR MONITORING SHALLOW AREAS

One of the fields in ocean research is dedicated to improving the efficiency of ocean resources. Modern methods of hydro acoustics can be more effective in the construction of equipment on the principles of the use of complex broadband signals. The article presents an analysis of the principles of construction of broadband hydro acoustic systems for monitoring and search of objects in the water column and the bottom. The main types of broadband signals are listed. Attention is focused on the emitting broadband antennas. The work focuses on two major groups of sonar locators: broadband parametric sonar broadband sonar and side-view (SHP LPG). The benefits of broadband parametric sonar and lists the most promising broadband parametric systems such as: compact parametric profiling, parametric seismoprofilograf, parametric sonars side-scan (multi-beam parametric profiling), parametric sonars traversing review. Some basic energy characteristics of parametric antennas are given. One of the ways to increase the speed of space review is presented-the method of medium frequency coloring. Features of monitoring of shallow water areas taking into account dispersion of broadband signals are presented. The case of the construction of broadband hydro acoustic antennas, sonar equipment side-scan consisting of different frequency transducers, mechanical related field. Given the directivity of the antenna layout on the broadband side-scan sonar at frequencies of 77; 100; 127 and 155 kHz. Features of construction of maps of depths with use of interferometric sonar of the lateral review are presented. Prospects of creation of the uniform system (database) of ecological supervision in which data from broadband survey and search systems for further processing and the analysis will be brought are resulted.

Broadband hydro acoustic system parametric side-scan sonar; broadband sonar of the lateral review; traverse review.

Введение. Создание принципов построения технологий комплексного обследования морского дна, включая состояние поверхности, структуру толщи дна, поиск неоднородностей и объектов на дне и в толще дна является актуальной задачей исследования океана.

Традиционно для этих целей используют гидролокаторы бокового обзора, многолучевые эхолоты и линейные профилографы. Растущие требования к качеству проводимых исследований требуют совершенствования техники. А современная элементная база и вычислительная техника позволяют вывести эти работы на

принципиально новый уровень исследований. Гидроакустические средства, могут быть более эффективными при построении аппаратуры на принципах использования сложных широкополосных сигналов. Для подводного поиска и наблюдения с помощью сложных сигналов удастся расширить зону обнаружения (за счет увеличения дальности действия). Использование широкополосных сигналов позволяет также, существенно увеличить разрешающую способность при соответствующей обработке. В гидроакустической звукоподводной связи, при нарастающем потоке информационных данных, без широкополосных сигналов не обойтись.

Широкополосными сигналами (ШПС) называются сигналы ширина спектра которых сравнима с центральной частотой. Иногда используется коэффициент $1/10$, т.е. если ширина спектра составляет около $1/10$ от частоты, на которой передается сигнал, то сигнал считается широкополосным. При более узком спектре сигнал будет узкополосным, при более широком – сверхширокополосным, у которых произведение активной ширины спектра F на длительность T много больше единицы. Сигналы, для которых произведение их длительности на ширину спектра, т.е. база, значительно превышает единицу ($B \gg 1$), получили название «сложных». Это произведение называется базой сигнала B . Для ШПС $B = FT \gg 1$ [1, 4].

Известно множество различных широкополосных сигналов. ШПС подразделяются на следующие виды:

- ◆ частотно-модулированные (ЧМ) сигналы;
- ◆ дискретные частотные (ДЧ) сигналы (сигналы с кодовой частотной модуляцией - КЧМ сигналы, частотно-манипулированные (ЧМ) сигналы);
- ◆ фазоманипулированные (ФМ) сигналы (сигналы с кодовой фазовой модуляцией - КФМ сигналы);
- ◆ многочастотные (МЧ) сигналы;
- ◆ дискретные составные частотные (ДСЧ) (составные сигналы с кодовой частотной модуляцией – СКЧМ сигналы) [5].

Сложные сигналы, в которых используются различные виды частотной модуляции (ЧМ) уже широко используются в гидролокации. Самым распространенным сигналом такого вида в настоящее время является линейно-частотно модулированный сигнал (ЛЧМ сигнал) [16].

Одним из видов сложных сигналов являются шумоподобные сигналы. Шумоподобными сигналами (ШПС) называют сигналы, у которых произведение ширины спектра на длительность T много больше единицы. Шумоподобные сигналы иногда называют сложными в отличие от простых сигналов. Применение шумоподобных сигналов в гидроакустике позволяет разрешить противоречие между дальностью действия и разрешающей способностью, т.е. при постоянной пиковой мощности передатчика получить увеличение разрешающей способности без снижения дальности. Это реализуется благодаря возможности свертки протяженного во времени и по частоте сигнала в узкий импульс в устройстве приема [19].

На сегодня применение ЛЧМ сигнала при сохранении высокой разрешающей способности по дальности, позволяет увеличить дальность действия гидролокатора в несколько раз.

Наиболее сложным блоком, в цепи широкополосных приемно-излучающих трактов гидроакустической аппаратуры связи и подводного наблюдения являются гидроакустические антенны. Вопросы с широкополосностью приемных антенн по большей части решены, а для излучающих – этот вопрос остается актуальным [20].

Наиболее перспективными гидроакустическими средствами комплексного изучения Мирового океана являются параметрические гидролокаторы (в том числе параметрические профилографы) и широкополосные гидролокаторы бокового обзора (в том числе широкополосные интерферометрические гидролокаторы бокового обзора).

Предпосылки применения параметрических гидролокаторов. В основе метода нелинейной гидроакустики лежат так называемые параметрические гидроакустические антенны. Параметрическая антенна (ПА) формируется в среде при коллинеарном взаимодействии интенсивных звуковых волн (волн накачки). Направленность излучения в параметрической антенне обеспечивается направленным высокочастотным преобразователем (излучателем). Волны накачки имеют, как правило, на порядок более высокую частоту по сравнению с излучаемыми рабочими волнами, сигналами параметрической антенны. Таким образом, параметрическая антенна является виртуальной антенной и представляет собой область среды, в которой в результате нелинейного взаимодействия волн накачки образуются вторичные источники, в том числе возбуждается низкочастотное параметрическое излучение.

Параметрические гидролокаторы имеют ряд преимуществ, к которым относятся:

- ◆ широкий диапазон рабочих (разностных) частот;
- ◆ высокая разрешающая способность по углу за счет высокой направленности антенны в режиме излучения;
- ◆ высокая разрешающая способность по дальности за счет излучения сложных широкополосных сигналов;
- ◆ постоянство ширины характеристики направленности антенны во всем диапазоне рабочих частот за счет особенностей формирования разностных частот;
- ◆ помехоустойчивость за счет очень малого уровня бокового излучения антенны;
- ◆ малые габариты, а следовательно, и вес антенны накачки.

В настоящее время наиболее перспективными являются следующие широкополосные параметрические системы:

- ◆ малогабаритные параметрические профилографы с рабочими (разностными) частотами, лежащими в диапазоне от 5 до 30 кГц, глубиной проникновения в грунт до 30 метров (зависит от типа грунта), шириной характеристики направленности несколько (2–5) градусов. При этом весь комплект аппаратуры может весить от нескольких кг, что позволяет размещать аппаратуру даже на маломерных носителях.

- ◆ параметрические сейсмопрофилографы с рабочими (разностными) частотами, лежащими в диапазоне от 300 Гц до 10 кГц, глубиной проникновения в грунт до 500 метров (зависит от типа грунта), шириной характеристики направленности несколько (2–5) градусов. Такие сейсмопрофилографы позволяют детально исследовать тонкую структуру дна при проникновении в грунт до 500 метров.

- ◆ параметрические гидролокаторы бокового обзора (многолучевые параметрические профилографы) с рабочими (разностными) частотами лежащими в диапазоне от 5 до 30 кГц, глубиной проникновения в грунт до 30 метров (зависит от типа грунта), при полосе обзора до 20 градусов. Такие гидролокаторы позволяют проводить масштабные исследования толщи грунта и получать дополнительную информацию о физических свойствах грунтов необходимых для классификации донных отложений.

- ◆ параметрические гидролокаторы траверзного обзора. Параметрические гидролокаторы траверзного обзора с рабочими (разностными) частотами лежащими в диапазоне от 5 до 30 кГц, с дальностью обзора пространства до 1000–1500 метров, в том числе в условиях мелководья. Область применения таких систем – это экологический мониторинг акватории, поиск объектов (поиск рыбных скоплений, подводных пловцов и др.) в толще воды, в том числе на мелководье. При этом ширина характеристики направленности таких систем составляет: по вертикали несколько (2–6 град), по горизонтали от 2 до 40 градусов.

Как известно, при расчете энергетических характеристик параметрических гидролокаторов основываются на уравнении гидролокации [12, 13]

$$I_c = \delta^2 I_{\text{п}}, \text{ или } P_c = \delta P_{\text{п}},$$

где I_c – интенсивность эхосигнала в точке приема, P_c – звуковое давление эхосигнала в точке приема, $I_{\text{п}}$ и $P_{\text{п}}$ – интенсивность и звуковое давление (соответственно) помех, δ – коэффициент распознавания.

При этом коэффициент распознавания δ для гидролокационной системы [9]

$$\delta = \frac{\sqrt{2} K_{\delta}}{\sqrt{\Delta f T}},$$

где K_{δ} – коэффициент надежности приема (минимально допустимое отношение сигнала к помехе на выходе индикатора); T – время усреднения сигнала (на практике принимаемое равным длительности импульса).

Интенсивность эхо-сигнала от цели с радиусом эквивалентной сферы R_3 определяется выражением

$$I_c = W_a \cdot \gamma_{\text{из}} \cdot R_3^2 \cdot 10^{-0,2\beta x} / (16 \cdot \pi \cdot x^4),$$

где W_a – акустическая мощность.

Параметрические гидролокаторы бокового обзора открывают новые перспективы в технологиях поиска и классификации затонувших объектов. В параметрических гидролокаторах бокового обзора классификацию осадков методом отраженных волн при наклонном падении луча можно определить, если положить, что скорость звука над исследуемым слоем зависит только от глубины. В этом случае траектория луча характеризуется фиксированным лучевым параметром pl , получаемым из закона Снеллиуса [6]:

$$pl = \frac{\sin \theta(z, pl)}{c(z)},$$

где z – глубина, $c(z)$ – профиль скорости звука, $\Theta(z, p)$ – угол между лучом, характеризующимся параметром pl , и вертикалью на глубине z .

Толщина слоя Δz и скорость звука в слое c_1 определяются по формулам:

$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}, \quad \Delta z = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1 - p^2 c^2},$$

где Δx – расстояние между приходом отраженных сигналов от нижней и верхней границы слоя, Δt – расстояние между приходом отраженных сигналов от верхней границы слоя.

Одним из способов увеличения скорости обзора пространства является, так называемый, способ частотного окрашивания среды – процесс создания пространственно-временного поля активными локаторами путем кодирования зондирующих сигналов, позволяющих улучшить характеристики углового разрешения объектов и измерения их координат. Применение частотного окрашивания среды целесообразно в параметрических гидролокаторах бокового обзора, где формируется несколько узконаправленных лучей. Таким образом, за одну посылку зондирующего сигнала предложенное устройство, используя метод частотного окрашивания среды и многоканальную временную обработку сигналов, просматривает информацию в восьми пространственных каналах с узкой характеристикой направленности, определяемой шириной характеристики направленности применяемой параметрической антенны и параметрами сложных ортогональных сигналов [12–14].

Остановимся немного на применении параметрических гидролокаторов в системах мониторинга мелководных районов (системах траверзного обзора), которые являются весьма перспективными. Параметрическая антенна благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот является устройством, создающим условия для реализации подходов, повышающих эффективность акустического зондирования в океане, особенно в мелком море, либо в морском волноводе. Известны способы, которые позволяют перенести принципы пространственной обработки сигналов в частотную область. Указанные принципы можно реализовать при одномодовом режиме возбуждения морского волновода в широкой полосе частот. Именно параметрическая антенна может обеспечить селективное возбуждение мод широкополосного акустического сигнала в морском волноводе. Взаимодействие акустических волн в приповерхностном слое воды, содержащем большое количество растворённого газа, происходит при наличии физической дисперсии скорости распространения волн в этом слое, а мелкое море является плоским волноводом, в котором присутствует явление геометрической дисперсии скорости звука [22].

Дисперсия оказывает существенное влияние на характер нелинейных процессов. Дисперсионные эффекты, как и нелинейные, при взаимодействии волн носят накапливающийся характер [18]. Даже при слабой дисперсии характер взаимодействия волн может заметно изменяться. Морская вода обладает очень слабой дисперсией, но наличие пузырьков газа, растворов солей, микроорганизмов могут существенно изменять её дисперсионные характеристики. Дисперсионные эффекты возникают также при взаимодействии различных мод в мелком море.

Явления волноводной дисперсии и сжатия широкополосного сигнала в морском волноводе могут быть использованы для повышения дальности действия гидролокаторов траверзного обзора при мониторинге мелководной акватории [22].

Предпосылки применения широкополосных гидролокаторов бокового обзора. Широкополосные гидролокаторы бокового обзора имеют такое преимущество, как повышенное разрешение с одновременным увеличением дальности действия. Ещё одним важным параметром современных гидролокаторов является помехоустойчивость. Использование сложного зондирующего сигнала решает эту проблему.

Одним из направлений кафедры Электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения является создание широкополосных гидроакустических антенн локаторов бокового обзора.

Рассмотрим построение широкополосных гидроакустических антенн, состоящих из разночастотных преобразователей, механически связанных по полю.

Рассмотрим случай, когда плоская антенная решетка состоит из разночастотных линеек преобразователей, связанных по полю, каждая из линеек имеет свои геометрические размеры. Антенна построена таким образом, что волновые размеры каждой линейки одинаковые, что и обеспечивает постоянство характеристики направленности во всем диапазоне частот. На рис. 1 представлен эскиз пьезоблока широкополосной антенны, а на рис. 2 диаграммы направленности на частотах 77, 100, 127 и 155 кГц [21].



Рис. 1. Пьезоблок широкополосной антенны

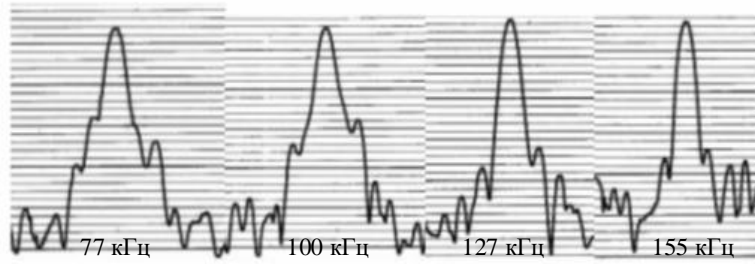


Рис. 2. Диаграммы направленности ШП антенны на частотах 77, 100, 127 и 155 кГц

Преимущество такого способа построения широкополосных гидролокаторов бокового обзора заключается в постоянстве ширины диаграммы направленности в широком диапазоне частот, при высоком КПД антенны.

Для измерения рельефа дна в гидролокатор бокового обзора включают дополнительные приемные каналы с дополнительными приемными антеннами в вертикальной плоскости. Эти приемные каналы позволяют получить дополнительный параметр – угол прихода эхосигнала, по которому вычисляется глубина. Такие гидролокаторы получили название интерферометрические гидролокаторы бокового обзора (ИГБО).

Вычисление профиля глубин основано на определении угла прихода $\varphi(\tau)$ отраженного импульса. В интерферометрических системах бокового обзора угол φ определяется на основе измерения разности фаз сигналов на отдельных антеннах. Вычисление же разности фаз сигналов осуществляется по измерениям фазы коэффициента взаимной корреляции R_{mn} сигналов $S_n(\tau)$ и $S_m(\tau)$ на элементах антенной решетки A_n, A_m :

$$R_{mn}(\tau) = \langle S_m(\tau) S_n^*(\tau) \rangle = R_0 \exp(i\Delta\varphi),$$

где угловые скобки означают усреднение, а значение угла прихода φ связано с фазой $\Delta\varphi$ соотношением:

$$\Delta\varphi = k(d_m - d_n) \sin \varphi,$$

$(d_m - d_n)$ – расстояние между антеннами; $k = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны.

Значение глубины H и горизонтальной дальности X определяется по известному значению угла прихода φ и наклонной дальности L :

$$H = L \cos \varphi, \quad X = L \sin \varphi.$$

Применение в ИГБО широкополосных технологий позволит получить качественно новый инструмент исследования дна Мирового океана с высокой разрешающей способностью и увеличенной дальностью действия, и возможностью построения карт глубин (батиметрии).

Заключение. Комплексирование указанных выше широкополосных систем позволяет получить карту акустических изображений поверхности дна и объектов на дне, карту глубин (батиметрию), профилограммы придонных слоев высокого разрешения и более глубокий разрез донных осадков высокого разрешения.

В дальнейшем планируется создать единую систему (базу данных) экологического наблюдения, в которую все эти данные будут вноситься для дальнейшей обработки и анализа. Систематическое проведение съемки заданного полигона

позволит отслеживать изменение состояния акватории. Данные комплексные исследования дают возможность регистрировать малейшие изменения состояния дна акватории, что особо важно в таких местах как водосбросные сооружения, места сброса вод и не только.

Помимо этого, система строится на гибком принципе и может дополняться данными с других устройств, например, с многолучевого эхолота или с системы электроразведки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kebkal A.G., Kebkal K.G., Komar M.* Data-link Protocol for Underwater Acoustic Networks // IEEE Conference Proceedings OCEANS 2005 Europe / 80 Min / 700 MB. – Publisher: Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Centre, 2005. MTS/IEEE Proceedings OCEANS 2005 Europe, Brest, France, 20-23 June 2005, «Today's Technology for a sustain-able future».
2. *Минаев Д.Д., Негода В.В., Леоненков Р.В., Корытко А.С.* Результаты экспериментальных исследований характеристик цифрового гидроакустического канала передачи информации в мелководном районе при наличии ледового покрова // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 2 (16). – С. 56-64.
3. *Kilfoyle D. B., Baggeroer A.B.* The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.
4. *Stojanovic M.* Multi-carrier wideband acoustic communications // Sea-technology. – 2007. – P. 41-44. – www.sea-technology.com.
5. *Мазурков М.И.* Системы широкополосной связи. – Одесса: Наука і техніка, 2009. – С. 297-304.
6. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др.* Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с.
7. *Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В.* К оценке широкополосности низкочастотных цилиндрических пьезопреобразователей // Акустический журнал. – 1983. – Т. 29, № 1. – С. 60-63.
8. *Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П.* Построение широкополосных и сверхширокополосных антенн гидроакустических поисковых средств // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012. – С. 108-111.
9. *Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.
10. *Pivnev P.P., Voronin V.A., Tarasov S.P., Soldatov G.V.* The Application Features of Sonar Systems for Control of Underwater Engineering Structures and Monitoring Area (Pages: 267-291) «Exploration and Monitoring of the Continental Shelf Underwater Environment». Edited by Iftikhar B. Abbasov, Wiley-Scrivener, 2018. – 318 p. ISBN: 978-1-119-48828-6.
11. Пьезокерамические преобразователи. Справочник / под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 356 с.
12. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
13. *Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
14. *Борисов С.А., Тарасов С.П., Филатов К.В.* Излучение пространственно частотных сигналов с помощью параметрических антенн // Межвузовский сборник «Теория электрических цепей и сигналов». – Таганрог: ТРТУ, 1994.
15. *Федосов В.П., Тарасов С.П., Пивнев П.П., Воронин В.В., Кучерявенко С.В., Легин А.А., Ломакина А.В., Франц В.А.* Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2018. – 178 с.
16. *Матвиенко Ю.В., Воронин В.А., Тарасов С.П., Скняря А.В., Тутьнин Е.В.* Пути совершенствования гидроакустических технологий обследования морского дна с использованием автономных необитаемых аппаратов // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 2 (8). – С. 4-15.

17. Залогин Н.Н., Скнар А.В. Зондирующие сигналы для активной локации высокого пространственного разрешения // Радиоэлектроника. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 3-8.
18. Есипов И.Б., Попов О.Е., Сизов И.И. Перспектива применения методов нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах // Ученые записки физического факультета МГУ, 6, 146342. – 2014. – С. 1-7.
19. Мосолов С.С., Скнар А.В., Тутьнин Е.В., Залогин Н.Н. Некоторые аспекты и перспективы применения сложных сигналов в гидроакустике // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН, 29 ноября - 3 декабря 2010. – С. 170-174.
20. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Широкополосные гидроакустические антенны систем экологического мониторинга водной среды и придонных осадочных пород // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 39, № 4-2 (39). – С. 26.
21. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Построение широкополосных и сверхширокополосных антенн гидроакустических поисковых средств // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012. – С. 108-111.
22. Пивнев П.П. Исследование взаимодействия многокомпонентного сигнала в средах с дисперсией // Сб. трудов XVIII сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2006. – Т. 1. – С. 127.

REFERENCES

1. Kebkal A.G., Kebkal K.G., Komar M. Data-link Protocol for Underwater Acoustic Networks, *IEEE Conference Proceedings OCEANS 2005 Europe / 80 Min / 700 MB*. – Publisher: Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Centre, 2005. *MTS/IEEE Proceedings OCEANS 2005 Europe, Brest, France, 20-23 June 2005*. «Today's Technology for a sustain-able future».
2. Minaev D.D., Negoda V.V., Leonenkov R.V., Korytko A.S. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy kharakteristik tsifrovogo gidroakusticheskogo kanala peredachi informatsii v melkovodnom rayone pri nalichii ledovogo pokrova [The results of experimental studies of the characteristics of digital hydroacoustic data transmission channel in shallow water area in the presence of ice cover], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 2 (16), pp. 56-64.
3. Kilfoyle D. B., Baggeroer A.B. The State of the Artin Underwater Acoustic Telemetry, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, Vol. 25, No. 1, зз. 4-27.
4. Stojanovic M. Multi-carrier wideband acoustic communications, *Sea-technology*, 2007, pp. 41-44. Available at: www.sea-technology.com.
5. Mazurkov M.I. Sistemy shirokopolosnoy svyazi [Broadband systems]. Odessa: Nauka I tekhnika, 2009, pp. 297-304.
6. Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E., Korepin E.A. i dr. Spravochnik po gidroakustike [Handbook of hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 552 p.
7. Kasatkin B.A., Matvienko Yu.V. K otsenke shirokopolosnosti nizkochastotnykh tsilindricheskikh p'ezopreobrazovateley [To the estimation of the broadband of low-frequency cylindrical piezoelectric transducers], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1983, Vol. 29, No. 1, pp. 60-63.
8. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Postroenie shirokopolosnykh i sverkhshirokopolosnykh antenn gidroakusticheskikh poiskovykh sredstv [Construction of broadband and ultra-wideband antennas of hydroacoustic search facilities], *Trudy XI Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of the XI all-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics"]. Saint Petersburg: Nauka, 2012, pp. 108-111.
9. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy [Parametric sonar system]. Rostov-on-Don: Rostizdat. 2004, 400 p.
10. Pivnev P.P., Voronin V.A., Tarasov S.P., Soldatov G.V. The Application Features of Sonar Systems for Control of Underwater Engineering Structures and Monitoring Area (Pages: 267-291) «Exploration and Monitoring of the Continental Shelf Underwater Environment». Edited by Iftikhar B. Abbasov, Wiley-Scrivener, 2018, 318 p. ISBN: 978-1-119-48828-6.
11. P'ezokeramicheskie preobrazovateli. Spravochnik [Piezoceramic transducers. The directory], ed. by S.I. Pugacheva. Leningrad: Sudostroenie, 1984, 356 p.

12. *Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear underwater acoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.
13. *Voronin V.A., Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I.* Nelineynye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [Nonlinear and parametric processes in ocean acoustics]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2007, 448 p.
14. *Borisov S.A., Tarasov S.P., Filatov K.V.* Izluchenie prostranstvenno chastotnykh signalov s pomoshch'yu parametricheskikh antenn [Radiation spatial frequency signals by using parametrical antennas], *Mezhvuzovskiy sbornik «Teoriya elektricheskikh tsepey i signalov»* [Interuniversity collection "Theory of electrical circuits and signals"]. Taganrog: TRTU, 1994.
15. *Fedosov V.P., Tarasov S.P., Pivnev P.P., Voronin V.V., Kucheryavenko S.V., Legin A.A., Lomakina A.V., Frants V.A.* Ceti svyazi dlya podvodnykh avtonomnykh robotizirovannykh kompleksov [Communication networks for underwater Autonomous robotic systems]. Rostov-on-Don: YuFU, 2018, 178 p.
16. *Matvienko Yu.V., Voronin V.A., Tarasov S.P., Sknarya A.V., Tutynin E.V.* Puti sovershenstvovaniya gidroakusticheskikh tekhnologiy obsledovaniya morskogo dna s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh apparatov [Ways to improve hydroacoustic technologies of seabed survey using Autonomous unmanned vehicles], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2009, No. 2 (8), pp. 4-15.
17. *Zalogin N.N., Sknarya A.V.* Zondiruyushchie signaly dlya aktivnoy lokatsii vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Probing signals for active location of high spatial resolution], *Radioelektronika* [Radioelectronics], 2016, Vol. 8, No. 1, pp. 3-8.
18. *Esipov I.B., Popov O.E., Sizov I.I.* Perspektiva primeneniya metodov nelineynoy akustikidlya gidrofizicheskikh issledovaniy na protyazhennykh trassakh [The prospect of using methods of nonlinear acoustics for hydrophysical studies on long routes], *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta MGU* [Scientific notes of the faculty of physics of Moscow state University], 6, 146342, 2014, pp. 1-7.
19. *Mosolov S.S., Sknarya A.V., Tutynin E.V., Zalogin N.N.* Nekotorye aspekty i perspektivy primeneniya slozhnykh signalov v gidroakustike [Some aspects and prospects of application of complex signals in hydroacoustics], *IV Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»* [IV all-Russian conference "radar And radio communication"]. Moscow: IRE RAN, 29 noyabrya - 3 dekabrya 2010, pp. 170-174.
20. *Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P.* Shirokopolosnye gidroakusticheskie anteny sistem ekologicheskogo monitoringa vodnoy sredy i pridonnykh osadochnykh porod [Broadband sonar antenna systems of ecological monitoring of the aquatic environment and the benthic sedimentary rocks], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2015, Vol. 39, No. 4-2 (39), pp. 26.
21. *Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P.* Postroenie shirokopolosnykh i sverkhshirokopolosnykh antenn gidroakusticheskikh poiskovykh sredstv [Construction of broadband and ultra-wideband antennas of hydroacoustic search facilities], *Trudy XI Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»]. Saint Petersburg: Nauka, 2012, pp. 108-111.
22. *Pivnev P.P.* Issledovanie vzaimodeystviya mnogokomponentnogo signala v sredakh s dispersiyey [Investigation of the interaction of a multicomponent signal in media with dispersion], *Sb. trudov XVIII sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Proceedings of the XVIII session of the Russian acoustic society]. Moscow: GEOS, 2006, Vol. 1, pp. 127.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Каевицер.

Пивнев Петр Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: pivnevpp@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 8-8634-37-17-95; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; доцент.

Pivnev Petr Petrovich – Southern Federal University; e-mail: pivnevpp@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +786343717-95; the department electrohydroacoustical and medical technology; associate professor.