

22. *Ibadov R.R., Fedosov V.P., Ibadov S.R., Gapon N.V., Sizyakin R.A.* Restoration of the Lost Map Area of the Underlying Image Surface Using the Reconstruction Method, *EPJ Web of Conferences*, 2019, Vol. 224, pp. 04003.
23. *Fedosov V.P., Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V.* Restoration of the Blind Zone of the Image of the Underlying Surface for Radar Systems with Doppler Beam Sharpening, *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE, 2019, pp. 424-427.
24. *Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V., Fedosov V.P.* Algoritm korrektsii kontrastnosti izobrazheniy v teplovom diapazone [The correction algorithm of the contrast of the images in the thermal range], *Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya* [Radar system for military and civilian use], 2018, No. 1, pp. 381-385.
25. *Ibadov R.R., Ibadov S.R., Gapon N.V., Tokareva O.A., Alepko A.V.* Research the textures synthesis method based on the neural network, *Matec. Web of Conferences*, 2018, Vol. 226, pp. 04043.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Ибадов Рагим Рауфевич – Южный федеральный университет; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; г. Шахты, Россия; тел.: 89298184480; ассистент.

Ибадов Самир Рауфевич – e-mail: kyuyuyuyuyuyuy@yandex.ru; тел.: 89518463738; ассистент.

Федосов Валентин Петрович – email: vpfed@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89525601246; д.т.н.; профессор.

Ibadov Ragim Raufevich – Southern Federal University; e-mail: ragim_ibadov@mail.ru; Shakh-ty, Russia; phone: +79298184480; assistant.

Ibadov Samir Raufevich – e-mail: kyuyuyuyuyuyuy@yandex.ru; phone: +79518463738; assistant.

Fedosov Valentin Petrovich – e-mail: vpfed@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525601246; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 656.7, 681.88

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-52-65

В.Ю. Волощенко, Е.В. Волощенко

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ГИДРОСАМОЛЕТОВ НА АКВАТОРИИ ГИДРОАЭРОДРОМА

Рассмотрены вопросы разработки технологий комплексной высокоточной навигации беспилотных гидросамолетов (БГС) для обеспечения как местоопределения, так и проводки в надводном положении в условиях ограниченной атмосферной видимости (низкая облачность, маскирующее действие гидрометеоров, ночное время и т.д.) на акватории гидроаэродрома с помощью гидроакустического канала дистанционного управления, функционирующего за счет использования донной сетевой структуры из оригинальных приемопередающих антенных устройств (ПАУ) Каждое отдельное ПАУ предложено использовать в качестве «всенаправленного» в верхней полусфере гидроакустического донного маяка, состоящего из m электроакустических преобразователей (ЭАП), каждый из которых функционирует в режиме излучающей параметрической антенны. Статически сформированные «парциальные» лепестки результирующей ХН ПАУ равномерно квантованы по m телесным секторам в полусфере, причем, за счет использования эффектов нелинейной акустики возможна индивидуальная «частотная окраска» каждого из m телесных секторов. В результате на границе раздела «вода – воздух» заданного участка акватории можно сформировать индивидуальное распределение «частотно-окрашенных пятен» локального ультразвукового облучения, причем, как сплошное, так и дискретное, последнее и можно рассматривать как отдельные точки необходимой траектории движения БГС, радиоэлектронное оборудование которого отслеживает расположенный впереди по курсу «акустически обозначенный» участок необходимого направления проводки.

Навигация на акватории гидроаэродрома; гидроакустические средства беспилотного гидросамолета; параметрическая излучающая антенна.

V.Yu. Voloshchenko, E.V. Voloshchenko

**THE UNMANNED AMPHIBIAN AIRCRAFT'S TECHNOLOGIES
OF COMPLEX NAVIGATION IN THE AVIATION WATER AREA**

The paper considers the development of technologies for integrated high-precision navigation of unmanned amphibian aircraft (UAA) to ensure both positioning and navigation on the surface in conditions of limited atmospheric visibility (low cloudiness, masking effect of hydrometeors, night time, etc.) in the seadrome's water area using hydroacoustic a remote control channel operating through the use of a bottom network structure of original transmitter-receiver antenna assemblies (TAA). Each individual TAA is proposed to be used as an "omnidirectional" sonar bottom beacon in the upper hemisphere, consisting of electroacoustic transducers (ET), each of which operates in the mode of the parametric transmitting array. The statically generated "partial" lobes of the resulting DP of single TAA are uniformly quantized over the bodily sectors in the hemisphere; moreover, due to the use of nonlinear acoustics effects, an individual "frequency coloration" of each of the bodily sectors is possible. As a result, an individual distribution of "frequency-colored spots" of local ultrasonic irradiation can be formed at the "water - air" interface of a given section of the aviation water area, and, both continuous and discrete, the latter can be considered as separate points of the required trajectory of the UAA, radio electronic equipment which tracks the "acoustically marked" section of the required direction of the wiring located ahead of the course.

Navigation on the seadrome's aviation water area; the unmanned amphibian aircraft's sonar navigation equipment; the parametric transmitting array.

Введение. В сфере транспортных коммуникаций известны системы обеспечения безопасной эксплуатации водной составляющей транспортной инфраструктуры для проводки надводных судов в сложных навигационных условиях на акватории портов, судоходных каналов, фарватеров рек, озер и морей [1–5]. В [1] для обозначения траектории проводки судна, идущего вдоль фарватера, на берегу устанавливаются два лазерных маяка, которые симметрично размещены и равноудалены относительно линии курса. Каждый из маяков в воздушной среде над поверхностью водной акватории формирует высоконаправленное электромагнитное излучение в диапазоне видимого спектра, причем, в азимутальной плоскости лазерные пучки синхронно перемещаются так, что в области их наложения в поперечных плоскостях относительно направления проводки образуются три отличающиеся друг от друга зоны видимости лазерного излучения. В результате визуально наблюдая зоны видимости лазерного излучения, судоводитель может оценить как направление, так и степень отклонения выбранного курса от осевой линии створа, т.е. необходимой траектории проводки судна. Работоспособность способа проводки основана на принципе функционирования лазерного створного маяка, что обеспечивает лишь прямолинейность траектории проводки судна, установка маяков делает невозможным проводку судна курсами как вдоль, так и от морского побережья на шельфе, причем, демаскирован как сам процесс проводки, так и место нахождения фарватера. В [2] предложено для обеспечения проводки судна на акватории использовать подводный гидроакустический канал. На грунте по обоим сторонам фарватера устанавливаются два гидроакустических маяка, каждый из которых излучает ультразвуковые сигналы на различных несущих частотах. На судне определяют направления на каждый гидроакустический маяк с помощью измерения взаимно корреляционных функций ультразвуковых сигналов, регистрируемых размещенными приемниками, базовая линия которых перпендикулярна диаметральной плоскости судна. Корреляционный метод пеленгования основан на измерении взаимных корреляционных функций между электрическими сигналами, снимаемых с выходов двух элементов приемной антенны, причем, на выходе тракта обработки вследствие конечности времени усреднения результирующий сигнал имеет флюктуирующую величину. При расширении полосы частот принимаемых

сигналов направленное действие корреляционного метода проявляется лишь в небольшой части диапазона углов пеленгования, т.е. двухэлементная антенна корреляционного пеленгатора имеет достаточно узкий основной лепесток характеристики направленности. Данный способ проводки судов имеет ограниченные эксплуатационные возможности, так как не обеспечивает возможности проводки нескольких судов по различным криволинейным траекториям сложной формы одновременно.

Следует отметить, что водная составляющая транспортной инфраструктуры Российской Федерации позволяет сформировать сеть круглогодичных гидроаэродромов для базирования и речных трасс для передвижения средств гидроавиации, что составит разветвленную амфибийную транспортную систему (АТС) страны. В рамках развития АТС актуальна разработка технологий комплексной высокоточной навигации и наведения беспилотных гидросамолетов (БГС) – носителей робототехнических комплексов (РТК) с использованием технического зрения, в частности, радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для оценки готовности как надводной, так и подводной частей взлетно-посадочной полосы (ВПП) к выполнению взлетно-посадочных действий [6, 7], а также гидроакустических короткобазисных навигационных систем (КНС) [9, 10], обеспечивающих точное местоопределение БГС – носителя РТК в надводном положении на акватории ЛБ гидроаэродрома [11, 12].

Донная сетевая структура приемноизлучающих антенных устройств. В [13] описан первый этап технологии подготовки к навигации ЛБ гидроаэродрома – определение положения ВПП, на которой планируется выполнение взлетно-посадочных действий БГС, разметка ВПП экипажем судна на воздушной полушке (СВП) посредством установки плавучих навигационных знаков (НЗ), осмотр акватории как визуально, так и с помощью устройств активной локации, размещенных на СВП, в радио- и ультразвуковом диапазонах. Для повышения безопасности взлетно-посадочных действий на акватории гидроаэродрома указанные выше операции предложено дополнить [4, 5, 8]. С целью оперативного контроля подводной обстановки [4, 5, 8] экипаж СВП размещает на дне акватории вдоль оси, выбранной ВПП, а также еще трех (образуют восьмиконечный крест, сдвинуты друг относительно друга на 45^0 , что соответствует возможным направлениям ветра) необходимое количество приемноизлучающих антенных устройств (ПАУ) полусферической формы [14]. ПАУ выполнено из m (192 шт.) одинаковых электроакустических преобразователей (ЭАП), апертуры которых аппроксимируют полусферическую поверхность, а акустические оси – равномерно распределены в полупространстве (8^0 при уровне 0,7 перекрытия основных лепестков характеристики направленности (ХН) ЭАП), выходя из одной точки, являющейся фазовым центром полусферы (диаметр 0,63 м, резонансная частота ЭАП $f_0=250$ кГц, диаметр ЭАП 0,059 м, 11 рядов ЭАП). Преимущества применения отдельных ПАУ при эхопоиске на мелководье подробно описаны в [15], причем, перспективно использование донной сетевой структуры из всех ПАУ для решения навигационных задач на акватории. Дело в том, что каждое отдельное ПАУ из донной сетевой структуры может быть использовано в качестве «всеполюсного» в верхней полусфере гидроакустического донного маяка (ГДМ), состоящего из m ЭАП, излучение которых обеспечено за счет использования для возбуждения каждого i – того ЭАП, где $i = (1 \div m)$, «индивидуального» бигармонического сигнала с частотами f_{1i}, f_{2i} , находящимися в его полосе пропускания, т.е. в режиме излучающей параметрической антенны (ПА). Режим излучающей параметрической антенны [11] позволяет генерировать полигармонический зондирующий сигнал как результат изменения упругих свойств нелинейной водной среды в области распространения мощного бигармонического (f_1, f_2) сигнала накачки, приводя к перераспределению энергии интенсивных ультразвуковых волн по частотной оси как

«вверх» – генерации высших гармонических компонент волн накачки, волны суммарной частоты ($nf_1, nf_2, f_+ = f_1 + f_2$), где $n = 2, 3, 4, \dots$, так и «вниз» – генерации волн разностной $F = |f_1 - f_2|$ частоты [16].

Рассмотрим возможность применения донного ПАУ в качестве «всенаправленного» в верхней полусфере гидроакустического донного маяка (ГДМ), состоящего из m ЭАП, для обеспечения навигации на акватории ЛБ по маршруту, безопасному для плавания БГС в условиях ограниченной видимости (низкая облачность, маскирующее действие гидрометеоров, ночное время и т.д.). Как отмечено в [15], статически сформированные «парциальные» лепестки результирующей ХН ПАУ [14] равномерно квантованы по m телесным секторам в полусфере, что позволяет оператору береговой гидроакустической службы гидроаэродрома непрерывно «просматривать» все окружающее пространство, определять пеленги и дистанции до всех целей, находящихся в зоне обзора. Следует отметить, что за счет использования эффектов нелинейной акустики возможна индивидуальная «частотная окраска» каждого из m телесных секторов, т.е. ПАУ позволяет квантовать телесные сектора обзора как по направлениям, так и по частоте регистрируемых и обрабатываемых экосигналов, которые поступают в «индивидуальные» приемные каналы в течение полного времени своего существования. Таким образом, на границе раздела вода – воздух заданного участка акватории можно сформировать индивидуальное распределение «частотно-окрашенных пятен» ультразвукового облучения, причем, как сплошное, так и дискретное, последнее и можно рассматривать как отдельные точки необходимой траектории движения БГС, РЭА которого отслеживает расположенный впереди по курсу «акустически обозначенный» участок необходимого направления проводки. Следует отметить, что как форма всей необходимой траектории движения, так и наличие ее отдельных «акустически освещенных» участков, ориентирующих движение БГС по водной поверхности в данный момент времени, определяется расположением на полусферической поверхности ПАУ необходимого количества ЭАП, задействованных в излучении. Например, для обеспечения проводки БГС по отрезку прямолинейной траектории в надводном положении по оси ВПП можно использовать возможность дискретного сканирования в вертикальной плоскости «парциальными» характеристиками направленности (ХН) от «меридиональных» излучающих ЭАП на рабочих сигналах $F_i = |f_{2i} - f_{1i}|$, $f_+ = f_{2i} - f_{1i}$, $2f_{2i}, 2f_{1i}, \dots, nf_{2i}, nf_{1i}$ ($n = 2, 3, \dots$) с необходимым шагом в некотором секторе (рис. 1, осуществляют «акустическую подсветку» два ЭАП левого ПАУ, пучки от которых заштрихованы).

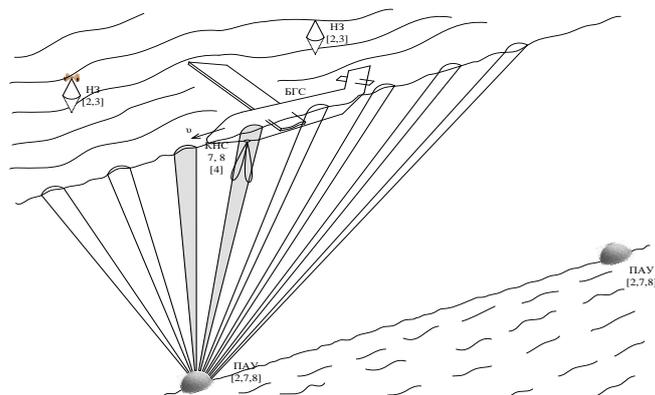


Рис. 1. Схема применения ПАУ [14] для обеспечения проводки БГС [8], снабженного КНС [9] по оси ВПП

В данном случае горизонтальные проекции акустических осей «веера» поочередно излучаемых приводных ультразвуковых полигармонических пучков будут совпадать с осью ВПП, а «пятна засветки» от каждого пучка совпадут с прямолинейной траекторией движения на водной поверхности БГС (рис. 1).

Схемное решение: короткобазисная навигационная система. Для обеспечения проводки БГС [8] по заданной траектории может быть использована КНС [9] (рис. 2). Излучающий тракт береговой гидроакустической службы гидроаэродрома, подключенный в данный момент через многоканальный коммутатор к необходимому для «акустической подсветки» i -му ЭАП 6 ПАУ, включает в себя источник питания 1, генераторы 2 и 3, вырабатывающие гармонические сигналы с частотами f_{1i}, f_{2i} , хронизатор-модулятор 4 и усилитель мощности 5. Итак, i -ый ЭАП 6 ПАУ, работая в режиме излучающей ПА, формирует в водной среде полигармонический акустический пучок, «акустически обозначающий» участок необходимого направления проводки БГС. При распространении в среде полигармонический сигнал со спектральными компонентами f_1, f_2 , $F = f_2 - f_1$, $f_+ = f_2 + f_1$, $2f_1, 2f_2$ достигает блока из двух групп акустических преобразователей (АП) 7,8, установленных на движущемся со скоростью U БГС.

Центры групп АП 7,8 разнесены в пространстве, их акустические оси сдвинуты друг относительно друга на угол $2\theta_{см}$ (рис. 2, 3), где $\theta_{см} = (0,5 - 0,7) \cdot \theta_{0,7}$, $\theta_{0,7}$ – угловая ширина по уровню 0,7 основного лепестка ХН групп АП 7 или АП 8 для рабочего сигнала [18]. Для осуществления поочередной пеленгации как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях предусмотрена возможность расположение в них плоскости равносигнальной зоны блока из двух групп акустических преобразователей (АП) 7,8 за счет поворота на 90^0 относительно равносигнального направления. Ниже рассмотрим процесс пеленгования в угломестной плоскости. Итак, в приеме для каждой гармонической компоненты будет существовать «индивидуальный» доплеровский сдвиг частот $(\pm f_{D(f_1)})$, $(\pm f_{D(2f_1)})$, $(\pm f_{D(f_2)})$, $(\pm f_{D(2f_2)})$, $(\pm F_D)$, $(\pm f_{D(f_+)})$, определяемый различием значений углов $\vartheta_{1,2}$ между вектором скорости БГС и направлениями от ЭАП 6 ПАУ к АП 7,8 КНС (рис. 1, 2). Электрические сигналы с двух групп АП 7,8, соответствующие принятому полигармоническому сигналу через компенсатор 9 поступают на входы 1-го и 2-го каналов обработки. Каналы содержат по пять цепочек из последовательно включенных полосовых фильтров (10), настроенных на частоты (f_1) , $(2f_1)$, $(2f_2)$, (F) , (f_+) , усилителей (11) и детекторов (12), на выходах которых для каждой из частот вырабатываются видеоимпульсные напряжения U_{1F} , $U_{1(f_1)}$, $U_{1(f_2)}$, $U_{1(2f_1)}$, $U_{1(2f_2)}$, $U_{1(f_+)}$ и U_{2F} , $U_{2(f_1)}$, $U_{2(f_2)}$, $U_{2(2f_1)}$, $U_{2(2f_2)}$, $U_{2(f_+)}$, амплитуды которых определяются расхождением искомого направления на излучающий ЭАП 6 ПАУ и равносигнальным направлением групп АП 7,8 КНС на используемых рабочих сигналах (рис. 3).

С выходов детекторов 1-го и 2-го каналов обработки соответствующие пары видеоимпульсных напряжений – $(U_{1F}$ и $U_{2F})$, $(U_{1(f_1)}$ и $U_{2(f_1)})$, $(U_{1(2f_1)}$ и $U_{2(2f_1)})$ и т.д. поступают через пятиходовые аналоговые ключи 13 на входы вычитающего устройства 14, выход которого соединен со вторым входом устройства отображения информации 15. Выбор необходимой пары видеоимпульсных напря-

жений, поступающих на два входа вычитающего устройства 14, осуществляется путем подачи соответствующего сигнала с блока управления 24 на управляющие входы аналоговых ключей 13. В КНС [9] пеленгование осуществляется на нескольких акустических сигналах с частотами $f_1, f_2, F = f_2 - f_1, f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$, что позволит регулировать точность пеленгования ЭАП 5 ПАУ за счет уменьшения угловой ширины основных лепестков ХН групп АП 7 и АП 8 в режиме приема для более высокочастотных сигналов.

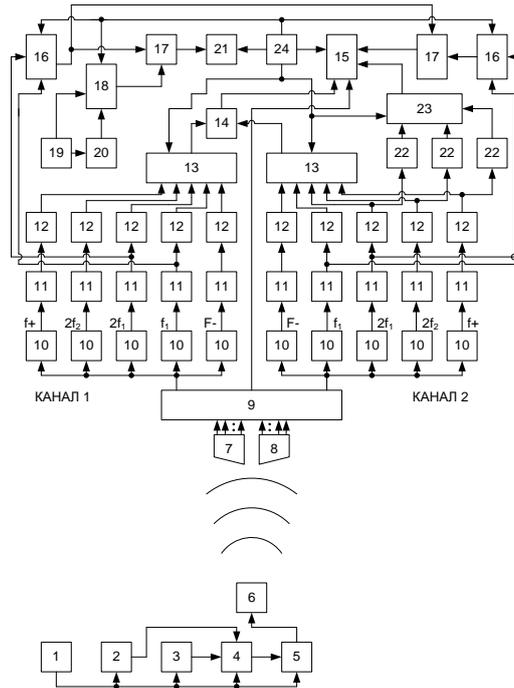


Рис. 2. Структурная схема КНС [6]

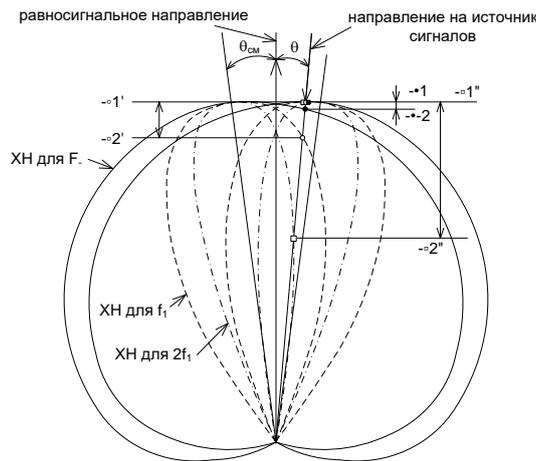


Рис. 3. Основные лепестки ХН групп АП 7,8 КНС [9]

Многочастотное пеленгование методом равносигнальной зоны. Следует учитывать, что направленность действия каждой группы АП 7,8 существенно зависит от волновых размеров их апертуры, т.е. от соотношения D/λ , где λ – длина волны принимаемого сигнала, D – их поперечный размер. Так, например, угловая ширина $\theta_{0,7}$ по уровню 0,7 основного лепестка ХН (в радианах) одного многоэлементного плоского круглого АП 7 или 8 с амплитудным распределением по поверхности, описываемом соотношением $(1-r^2)^4$, где r – радиальная координата, отсчитываемая от центра поверхности АП, рассчитывается как отношение $1,81 \cdot \lambda/D$ при уровне первого бокового максимума 0,9% от величины основного [18]. Тогда для АП диаметром 10 см и длинах волн принимаемых сигналов: $\lambda_F=75$ мм (20 кГц), $\lambda_f=6$ мм (250 кГц) и $\lambda_{2f}=3$ мм (500 кГц) значения угловой ширины $\theta_{0,7}(F, f, 2f)$ основного лепестка по уровню 0,7 составят $\sim 78^0, 5^0$ и $2,5^0$ соответственно, что при соблюдении условия $\theta_{см} \approx (0,5 - 0,7) \cdot \theta_{0,7}$ для двух групп АП 7,8 КНС обеспечит сектора обзора по уровню 0,7 $\theta_{0,7(зр АП)} \sim 105^0, 10^0$ и 5^0 соответственно (рис. 3). Таким образом, пеленгование ЭАП 6 ПАУ с помощью КНС [9] может обеспечить три режима: – на сигнале $F=20$ кГц – дальний привод БГС с невысокой точностью; – на сигнале $f=250$ кГц – уточнение позиции БГС для средних дистанций; – на сигнале $2f=500$ кГц – ближний привод БГС с высокой точностью. Точность осуществляемой многочастотной пеленгации можно численно оценить, используя выражение [19]

$$\Delta\theta_{\min} = 0,089 \cdot \mu \cdot (\theta_{0,7(зр АП)})^2 / \theta_{см}, \quad (1)$$

где $\Delta\theta_{\min}$ – угол, при котором КНС [6] уверенно фиксирует $\Delta U = U_1 - U_2$ результирующий электрический сигнал рассогласования 1-го и 2-го каналов на рабочих частотах, $\mu = (0,05 - 0,15)$ – для визуального индикатора.

Пеленгование методом равносигнальной зоны осуществляется путем определения разности видеоимпульсных напряжений $\Delta U = U_1 - U_2$ (точки - • - 1, 2 – для $F=20$ кГц, - ◦ - 1', 2' – для $f=250$ кГц, - ◻ - 1'', 2'' – для $2f=500$ кГц, рис. 3) в вычитающем устройстве 14, на входы которого с выходов 1-го и 2-го каналов приемного тракта КНС на рабочих сигналах – или разностной $F = f_2 - f_1$, или накачки f_1, f_2 , или высокочастотных $2f_1, 2f_2$ поступают через аналоговые ключи 13 соответствующие пары видеоимпульсных напряжений, например, – (U_{1F} и U_{2F}), ($U_{1(f_1)}$ и $U_{2(f_1)}$), ($U_{1(2f_1)}$ и $U_{2(2f_1)}$) и т.д., амплитуды которых изменяются при повороте ХН групп АП 7,8 компенсатором 9 в процессе пеленгации ЭАП 6 ПАУ, причем, очевидно, что пеленгационная чувствительность $S_{\text{пел}} = \Delta U / \Delta\theta$ приемного тракта КНС тем выше, чем больше частота рабочего сигнала. При нахождении ЭАП 6 ПАУ на линии, проходящей через точки пересечения ХН обоих групп АП 7,8 и называемой линией равносигнального направления, сигналы обоих каналов равны ($U_{1F} = U_{2F}$ и $U_{1(f_1)} = U_{2(f_1)}$ и $U_{1(2f_1)} = U_{2(2f_1)}$) и напряжение ΔU будет равно нулю, что и будет регистрироваться устройством отображения информации 15. Напряжение, пропорциональное величине угла поворота θ равносигнального направления антенной системы, с дополнительного выхода компенсатора 9, поступает на

первый вход устройства отображения информации 15, которое индицирует информацию о угле места θ_B пеленгуемого ЭАП 6 ПАУ в угломестной плоскости.

Схемные решения: дополнительные пеленгационные тракты. В пеленгационном тракте на основе эффекта Доплера в первом частотном дискриминаторе 17 обрабатываются пары электрических сигналов с частотами $(f_1 \pm f_{D(f_1)})_{1к}$ и $(f_1 \pm f_{D(f_1)})_{2к}$ или $(2f_1 \pm f_{D(2f_1)})_{1к}$ и $(2f_1 \pm f_{D(2f_1)})_{2к}$ из 1-го и 2-го каналов, которые через двухвходовые аналоговые ключи 16 поступают с выходов соответствующих усилителей 11. Выходной сигнал первого частотного дискриминатора 17 пропорционален разности доплеровских частот указанных пар электрических сигналов и отображается устройством отображения информации 15. При нахождении БГС непосредственно над излучающим ЭАП 6 ПАУ равносигнальное направление групп АП 7,8 будет совпадать с вертикалью, что в силу конструктивных особенностей приемной антенны обусловит следующее расположение в пространстве основных максимумов групп АП 7,8 – один под углом $(90^0 - \theta_{см})$, а другой – $(90^0 + \theta_{см})$ относительно вектора скорости БГС, что обеспечит как разные знаки («+» – канал 1 и «-» – канал 2), так и наименьший доплеровский сдвиг в обоих каналах на рабочих сигналах с частотами f_1 и $2f_1$. На выходе первого частотного дискриминатора 17 вырабатывается сигнальное напряжение U_B , амплитуда которого пропорциональна разности доплеровских частот первого и второго каналов на используемых рабочих сигналах с частотами f_1 и $2f_1$,

$$[f_{D1K(f_1)} - f_{D2K(f_1)}] = 2 \cdot v \cdot f_1 \cdot \sin(0,6 \cdot \theta_{0,7(f_1)})/c, \quad (2)$$

$$[f_{D1K(2f_1)} - f_{D2K(2f_1)}] = 2 \cdot v \cdot 2f_1 \cdot \sin(0,8 \cdot \theta_{0,7(2f_1)})/c. \quad (3)$$

В соответствии с АЧХ частотного дискриминатора для рабочих сигналов с частотой $2f_1$, и, соответственно, больших разностей доплеровских сдвигов в 1-ом и 2-ом каналах, величина сигнального напряжения $U_{B(2f_1)}$ имеет большую величину, чем аналогичная величина $U_{B(f_1)}$ для рабочего сигнала с частотой f_1 , что позволяет увеличить как отношение «сигнал/шум», так и помехоустойчивость рассматриваемого приемного тракта. Выбор рабочего сигнала осуществляется за счет подачи с блока управления 24 сигналов на управляющие входы как пятиходовых (13), так и двухвходовых (16) аналоговых ключей.

Предположим, что осуществляется завершающая стадия точного определения местоположения ЭАП 6 ПАУ при маневрировании БГС, в процессе выполнения которой целесообразно иметь возможность получения информации и о дальности до него. В данном случае для определения расстояния до пеленгуемого ЭАП 6 ПАУ можно использовать физические особенности параметрической генерации в водной среде акустических сигналов суммарной $f_+ = f_2 + f_1$ частоты, вторых гармоник $2f_1, 2f_2$ волн накачки, осевые распределения уровней звуковых давлений которых описываются следующими зависимостями [16]

$$P_+ = \frac{\varepsilon \omega_+ p_{01} p_{02} l_{Д}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0,25 \ln^2(1 + Z_H^2) + \arctg^2 Z_H}{1 + Z_H^2}} \cdot \exp(-\alpha_+ z), \quad (4)$$

$$P_{2f_{1,2}} = \frac{\varepsilon \omega_{1,2} p_{01,02}^2 l_{Д1,2}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0,25 \ln^2(1 + Z_{H1,2}^2) + \arctg^2 Z_{H1,2}}{1 + Z_{H1,2}^2}} \exp(-\alpha_{2f_{1,2}} z), \quad (5)$$

где $\omega_+ = 2\pi(f_1 + f_2)$, $\omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2}$, $P_{01,02}$ – амплитуды звукового давления сигналов накачки с частотами $f_{1,2}$ у поверхности ЭАП 6 ПАУ; $l_D = a^2 \omega_0 / 2c_0$, $l_{D1,2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$ – длины зон дифракции Френеля для сигналов – центральной частотой накачки $f_0 = (f_1 + f_2) / 2$ и исходных частот f_1, f_2 ; $Z_H = z / l_D$, $Z_{H1,2} = z / l_{D1,2}$ – нормированная продольная координата; $\alpha_+, \alpha_{2f1,2}$ – коэффициенты затухания акустических сигналов суммарной частоты, вторых гармоник исходных волн накачки. Исходя из соотношений (4), (5), приблизительную оценку дальности до излучающего ЭАП 6 ПАУ с борта БГС можно осуществить, например, разделив друг на друга аналитические выражения вида (5) для амплитуд звуковых давлений P_{2f1} и P_{2f2} вторых гармоник исходных сигналов накачки. С учетом того, что вторые сомножители, описывающие осевые распределения данных сигналов, приблизительно равны друг другу при условии, что частоты накачки $f_1 \approx f_2$. В этом случае мы получим

$$P_{2f1} \approx (f_1 / f_2)^2 \cdot P_{2f2} \cdot \exp[(\alpha_{2f1} - \alpha_{2f2}) \cdot z]. \quad (6)$$

Взяв натуральный логарифм от (6), можно рассчитать дальность

$$z \approx \frac{\ln(P_{2f1} \cdot f_2^2 / P_{2f2} \cdot f_1^2)}{\alpha_{2f1} - \alpha_{2f2}}. \quad (7)$$

Приемный тракт для расчета дистанции до ЭАП 6 ПАУ включает в себя три измерителя амплитуд 22 и вычислительный блок 23, причем, входы измерителей амплитуд 22 соединены с выходами детекторов 12 во 2-ом канале. В момент точной пеленгации излучающего ЭАП 6 ПАУ по сигналу с блока управления 24 производятся необходимые вычисления, результаты которых поступают на четвертый вход устройства отображения информации 15.

Расчет дальности действия КНС на рабочих частотах. Оценим энергетическую дальность действия ЭАП 6 ПАУ, т.е. дистанции пеленгации ЭАП 6 ПАУ как элемента сетевой системы на акватории гидроаэродрома с борта БГС. Расчет проведем для сигналов: накачки $f = 250$ кГц, второй гармоники $2f = 500$ кГц, разностной $F = 20$ кГц, генерируемых ЭАП 6 в параметрическом режиме излучения [16]. Соосные пучки акустической «подсветки» в водной среде имеют на частотах – $f = 250$ кГц, $2f = 500$ кГц, $F = 20$ кГц – следующие диаметры их поперечных сечений для различных дальностей: $z = 50$ м – $\varnothing 3,5$ м, $2,6$ м, $4,4$ м; $z = 100$ м – $\varnothing 7$ м, $5,2$ м, $8,8$ м. Примем величины уровней шумов в дБ относительно 2×10^{-5} Па и приведенное звуковое давление помех на частоте 1 кГц в полосе частот 1 Гц при ненаправленном приеме на частотах: $f = 250$ кГц $\rightarrow 30$ дБ, $p_{np(f)} = 63,2 \times 10^{-5}$ Па; $2f = 500$ кГц $\rightarrow 25$ дБ, $p_{np(2f)} = 35,6 \times 10^{-5}$ Па, $F = 20$ кГц $\rightarrow 50$ дБ, $p_{np(F)} = 632 \times 10^{-5}$ Па [18]. Тогда звуковое давление помех p_{II} (Па), вычисленное для частоты f (кГц) в полосе частот $\Delta f = 100$ Гц при направленном приеме (γ_{II} – коэффициент осевой концентрации группы ЭАП 7 КНС при радиусе 0,1 м) составит на частотах: $f = 250$ кГц – $p_{II(f)} = 0,024 \times 10^{-5}$ Па ($\gamma_{II(f)} = 9860$); $2f = 500$ кГц – $p_{II(2f)} = 0,0034 \times 10^{-5}$ Па ($\gamma_{II(2f)} = 32867$); $F = 20$ кГц – $p_{II(F)} = 71 \times 10^{-5}$ Па

($\gamma_{П(2f)}=108$). В данном случае величины приведенных звуковых давлений с учетом затухания $P_{ПП1M(f)}$, $P_{ПП1M(2f)}$, $P_{ПП1M(F)}$ акустических сигналов, формируемых ЭАП 6 ПАУ на расстояние 1 метр от его поверхности, составят $0,2322 \cdot 10^5$, $0,0277 \cdot 10^5$, $0,0008 \cdot 10^5$ (Па \times м) соответственно. Значения коэффициентов затухания α (дБ/м) на соответствующих частотах (1/с) рассчитывались для пресной воды с загрязнениями по соотношению $\alpha = 2,4 \times 10^{-10} \times f^{1,5}$ [18] и составили: $f=250$ кГц - $\alpha_f=30$ (дБ/км); $2f=500$ кГц - $\alpha_{2f}=85$ (дБ/км); $F=20$ кГц - $\alpha_F=0,68$ (дБ/км), а для морской воды выбирались из таблиц [18] и составили: $f=250$ кГц - $\alpha_f=86$ (дБ/км); $2f=500$ кГц - $\alpha_{2f}=172$ (дБ/км); $F=20$ кГц - $\alpha_F=1,72$ (дБ/км). Акустическая мощность $W_{a(f)}$, излучаемая ЭАП 6 ПАУ на сигнале накачки с частотой f , составляет ~ 40 Вт и вычислена из соотношения [19]

$$P_{ПП1M(f)} = 3.46 \cdot 10^2 \cdot (W_{a(f)} \cdot \gamma_{эап6(f)})^{0,5}, \quad (8)$$

где $\gamma_{эап6(f)}$ – коэффициент концентрации ЭАП 6 на частоте f . С учетом того, что для параметрического режима излучения ЭАП 6 ПАУ необходим сигнал бигармонической накачки, то общая излучаемая акустическая мощность $W_{a(f_1+f_2)} \approx 80$ Вт.

Представленных выше данных достаточно для того, чтобы с помощью уравнений пассивного локатора $SL_{f,2f,F} - TL_{f,2f,F} = NL_{f,2f,F} + DT$ [18] оценить дальность действия КНС [6] на рабочих сигналах f ; $2f$; F . В уравнениях для сигналов с частотами f , $2f$, F только одно слагаемое – параметр, относящийся к приемному тракту КНС – будет неизменно: порог обнаружения $DT = 20 \lg \delta = 12$ дБ; где $\delta = 4$ – коэффициент распознавания. Остальные же слагаемые - параметры будут различны: $SL_{f,2f,F} = 20 \lg P_{ПР1M(f,2f,F)}$ – уровни источников «приводных» сигналов с частотами $f, 2f, F$ в дБ относительно 1 мкПа на акустической оси для удаления 1м от ЭАП 6; $TL_{f,2f,F} = 20(3 + \lg z) + \alpha_{(f,2f,F)} \cdot z$ – потери акустической энергии «приводных» сигналов с частотами $f, 2f, F$ в среде за счет сферического расширения волнового фронта при «прямом» распространении и затухания, дБ; $NL_{f,2f,F} = 20 \lg [P_{nc(f,2f,F)} \cdot \Delta f_{(f,2f,F)}^{0,5} / f_{f,2f,F} \cdot \gamma_{np(f,2f,F)}^{0,5}]$ – уровень шума на частотах $f, 2f, F$ в месте расположения обеих групп приемных АП 7,8 КНС в дБ относительно 1 мкПа ($P_{nc(f,2f,F)}$ – суммарный уровень помех на частотах $f, 2f, F$ в месте установки антенны, приведенный к стандартным условиям, Па; $\Delta f_{(f,2f,F)}$ – ширина полосы пропускания приемного тракта для частот $f, 2f, F$, Гц; $f_{(f,2f,F)}$ – значение рабочей частоты $f, 2f, F$ пеленгования КНС, кГц; $\gamma_{np(f,2f,F)}$ – коэффициент направленности (концентрации) при приеме на частотах $f, 2f, F$). Таким образом, левая часть уравнений пассивного локатора – выраженные в дБ относительно эталонного уровня 1мкПа величины амплитуд звукового давления «прямых» сигналов (Direct Signal Level, DSL) «приводной акустической подсветки» с частотами $f, 2f, F$ на оси полигармонического ультразвукового пучка, которые с учетом сферического расширения волнового фронта и затухания по-

следних может обеспечить ЭАП 6 ПАУ в месте расположения на БГС обеих групп АП 7,8 КНС, правая часть – пороговые уровни этих же сигналов, при которых еще обеспечивается надежная работа КНС БГС в указанных условиях.

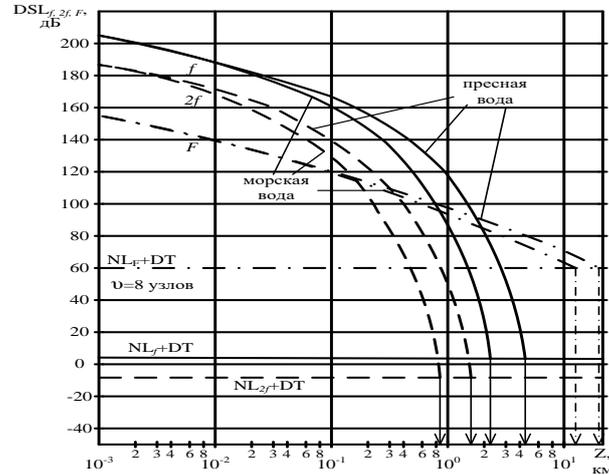


Рис. 4. Диаграмма параметров КНС [9] для пеленгации «приводного» ЭАП 6 ПАУ с борта БГС как в пресной, так и в морской воде

Совокупность численных значений этих параметров для сигналов с частотами $f, 2f, F$ нанесенная на поле диаграммы с осями « DSL_{f, DSL_{2f}, DSL_F} , дБ – дальность z , км», позволит оценить максимальные дальности пеленгации ЭАП 6 ПАУ с борта БГС с помощью КНС [9].

Выводы. На рис. 4 представлена диаграмма параметров КНС [9] для пеленгации «приводного» i -го ЭАП 6 ПАУ с борта БГС как в пресной, так и в морской воде, включающая в себя следующие зависимости: 1) кривые DSL_F (•—•—), DSL_{2f} (- - -), DSL_f (—), отображающие характеристики расчетного режима работы ЭАП 6 ПАУ; 2) прямые $NL_{(F)} + DT$ (•—•—), $NL_{(f)} + DT$ (- - -) и $NL_{(2f)} + DT$ (—), отображающие при заданном пороге обнаружения DT уровни маскирующей шумовой помехи в месте установки групп приемных ЭАП 7,8 на движущемся со скоростью $U=8$ узлов в надводном положении БГС на частотах $F, f, 2f$ рабочих сигналов КНС при одинаковой ширине полосы пропускания приемных трактов (100 Гц). Из совместного анализа расчетных графиков, представленных на рис. 4 следует, что КНС [9] обеспечивает уверенное пеленгование i -го ЭАП 6 ПАУ при движении БГС на рабочих частотах до дистанций: 1) разностной $F=20$ кГц – $z_{F(\max)пресн} \approx 20$ км (пресная вода) и $z_{F(\max)морск} \approx 12$ км (морская вода), 2) накачки $f=250$ кГц – $z_{f(\max)пресн} \approx 4$ км (пресная вода) и $z_{f(\max)морск} \approx 2,3$ км (морская вода), 3) второй гармоники $2f=500$ кГц – $z_{2f(\max)пресн} \approx 1,5$ км (пресная вода) и $z_{2f(\max)морск} \approx 0,8$ км (морская вода) [20]. Энергетическую дальность действия на всех рабочих частотах ограничивает изотропная шумовая помеха: наибольшее ограничение ($F, +61$ дБ) наблюдается на

низкой частоте, а наименьшее – на высоких (f , +4 дБ, $2f$, - 8 дБ). Для дистанций до 100 м, т.е. соизмеримых с поперечными размерами ВПП гидроаэродрома, как для пресной, так и для морской воды в условиях повышенной шумовой помехи (до +160 дБ – шум турбин самолета в воздушной среде на удалении 5 м) является оптимальным использование высокочастотных сигналов (f , $2f$,) соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способ проводки речных и морских судов по заданной траектории. Пат. №2302357, Российская Федерация, кл. В 63В 51/02, опубл. 10.07.2007. – 5 с.
2. *Leroy C.C.* Navigation Maritime Acoustique dans le chenaux Etroits // *Navigation*, (Fr.). – 1972. – Vol. XX, No. 80. – P. 412-425.
3. Способ формирования зон ориентирования с помощью лазерного створного маяка. Пат. №2354580, Российская Федерация, №2008100256/11; заявл. 15.01.2008, опубл. 10.05.2009. – 5 с.
4. Арктическая подводная навигационная система для вождения и навигационного обеспечения надводных и подводных объектов навигации в стесненных условиях плавания. Пат. 2596244 Российская Федерация, №2015133286/28; заявл. 10.08.2015, опубл. 10.09.2016.
5. Способ проводки морских и речных судов по заданному курсу. Пат. №2491204, Российская Федерация, №2009146160/11; заявл. 15.12.2009, опубл. 27.08.2013. – 5 с.
6. Способ подготовки летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета. Пат. №2464205, Российская Федерация, № 2011112733/11; заявл. 01.04.2011; опубл. 20.10.2012. – 23 с.
7. Способ подготовки взлетно-посадочной полосы летного бассейна гидроаэродрома для выполнения взлета и приводнения гидросамолета. Пат. №2539039, Российская Федерация, №2013129511/11; заявл. 27.06.2013г.; опубл. 10.01.2015. – 3 с.
8. Способ проводки беспилотного гидросамолета на акватории летного бассейна. Пат. №2705475, Российская Федерация, №2018147317, заявл. 28.12.2018, опубл. 7.11.2019. – 30 с.
9. Многочастотная навигационная система. Пат. №86321, Российская Федерация, № 2009106613/22; заявл. 25.02.2009; опубл. 27.08.2009. – 3 с.
10. Акустический пеленгатор. Пат. №2138059 Российская Федерация, №96113765/09; заявл. 05.07.1996; опубл. 20.09.1999. – 7 с.
11. *Voloshchenko V.Y.* Seadrome: Technologies of Complex Navigation for Amphibious Unmanned Aerial Vehicles in the Seaplane Basin // *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*. – 2018. – No. 51 (1). – P. 102-111. – DOI 10.3103/S1068799818010166. – <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068799818010166>.
12. *Voloshchenko V.Y., Voloshchenko A.P., Voloshchenko E.V.* Seadrome: Unmanned Amphibious Aerial Vehicle Sonar Equipment for Landing-Takeoff and Water Area Navigation // *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*. – 2020. – No. 63 (1). – P. 153-163. – DOI 10.3103/S1068799820010225. – <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068799820010225>.
13. Способ подготовки гидроаэродромов для выполнения взлета и посадки гидросамолетов. Пат. №2093428, Российская Федерация, №94036394/11, заявл. 29.09.1994; опубл. 20.10.1997. – 4 с.
14. Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство. Пат. №104732, Российская Федерация, № 2010149910/28; заявл. 03.12.2010; опубл. 20.05.2011. – 2 с.
15. *Волощенко В.Ю.* Гидроаэродром: повышение безопасности взлетно-посадочных действий на акватории летного бассейна // *Известия ВУЗов. Авиационная техника*. – 2016. – № 2. – С. 108-113.
16. *Волощенко В.Ю., Тимошенко В.И.* Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения (Ч. 1). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 294 с.
17. *Гидроакустическая энциклопедия*. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 788 с.
18. *Евтютов А.П., Ляликов А.П., Митько В.Б. и др.* Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.

19. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1986. – 272 с.
20. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения (Ч. II): монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 176 с.

REFERNCES

1. Sposob provodki rechnykh i morskikh sudov po zadannoy traektorii. Pat. №2302357, Rossiyskaya Federatsiya, kl. V 63V 51/02, opubl. 10.07.2007 [A method for conducting river and sea vessels along a given trajectory. Patent No. 2302357, Russian Federation, cl. B 63B 51/02, publ. 10.07.2007], 5 p.
2. Leroy C.C. Navigation Maritime Acoustique dans le chenaux Etroits, *Navigation, (Fr.)*, 1972, Vol. XX, No. 80, pp. 412-425.
3. Sposob formirovaniya zon orientirovaniya s pomoshch'yu lazernogo stvornogo mayaka. Pat. №2354580, Rossiyskaya Federatsiya, №2008100256/11; zayavl. 15.01.2008, opubl. 10.05.2009 [Method of formation of zones of orientation with a laser flap gate lighthouse. Patent No. 2354580, Russian Federation, No. 2008100256/11; decl. 15.01.2008, publ. 10.05.2009], 5 p.
4. Arkticheskaya podvodnaya navigatsionnaya sistema dlya vozhdeniya i navigatsionnogo obespecheniya nadvodnykh i podvodnykh ob'ektov navigatsii v stesnennykh usloviyakh plavaniya. Pat. 2596244 Rossiyskaya Federatsiya, №2015133286/28; zayavl. 10.08.2015, opubl. 10.09.2016 [Arctic underwater navigation system for driving and navigation support of surface and underwater navigation objects in restricted navigation conditions. Pat. 2596244 Russian Federation, No. 2015133286/28; decl. 10.08.2015, publ. 10.09.2016].
5. Sposob provodki morskikh i rechnykh sudov po zadannomu kursu. Pat. №2491204, Rossiyskaya Federatsiya, №2009146160/11; zayavl. 15.12.2009, opubl. 27.08.2013 [Method of conducting sea and river vessels at a given course. Patent No. 2491204, Russian Federation, No. 2009146160/11; decl. 15.12.2009, publ. 27.08.2013], 5 p.
6. Sposob podgotovki letnogo basseyna gidroaerodroma dlya vypolneniya vzleta i privodneniya gidrosamoleta. Pat. №2464205, Rossiyskaya Federatsiya, № 2011112733/11; zayavl. 01.04.2011; opubl. 20.10.2012 [The method of preparation of the flight basin hydro-port to perform takeoff and landing seaplane. Patent No. 2464205, Russian Federation, No. 2011112733/11; decl. 01.04.2011; publ. 20.10.2012], 23 p.
7. Sposob podgotovki vzletno-posadochnoy polosy letnogo basseyna gidroaerodroma dlya vypolneniya vzleta i privodneniya gidrosamoleta. Pat. №2539039, Rossiyskaya Federatsiya, №2013129511/11; zayavl. 27.06.2013g.; opubl. 10.01.2015 [The method of preparing a runway of flight basin of the hydro-port to perform takeoff and landing seaplane. Patent No. 2539039, Russian Federation, No. 2013129511/11; decl. on 27.06.2013; publ. on 10.01.2015], 3 p.
8. Sposob provodki bespilotnogo gidrosamoleta na akvatorii letnogo basseyna. Pat. №2705475, Rossiyskaya Federatsiya, №2018147317, zayavl. 28.12.2018, opubl. 7.11.2019 [The method of conducting an unmanned seaplane in the water area of the flight pool. Patent No. 2705475, Russian Federation, No. 2018147317, decl. on 28.12.2018, publ. on 7.11.2019], 30 p.
9. Mnogochastotnaya navigatsionnaya sistema. Pat. №86321, Rossiyskaya Federatsiya, № 2009106613/22; zayavl. 25.02.2009; opubl. 27.08.2009 [Multi-frequency navigation system. Patent No. 86321, Russian Federation, No. 2009106613/22; decl. 25.02.2009; publ. 27.08.2009], 3 p.
10. Akusticheskij pelengator. Pat. №2138059 Rossiyskaya Federatsiya, №96113765/09; zayavl. 05.07.1996; opubl. 20.09.1999 [Acoustic direction finder. Patent No. 2138059 Russian Federation, No. 96113765/09; decl. 05.07.1996; publ. 20.09.1999], 7 p.
11. Voloshchenko V.Y. Seadrome: Technologies of Complex Navigation for Amphibious Unmanned Aerial Vehicles in the Seaplane Basin, *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*, 2018, No. 51 (1), pp. 102-111. Doi 10.3103/S1068799818010166. Available at: <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068799818010166>.
12. Voloshchenko V.Y., Voloshchenko A.P., Voloshchenko E.V. Seadrome: Unmanned Amphibious Aerial Vehicle Sonar Equipment for Landing-Takeoff and Water Area Navigation, *Russian Aeronautics (Iz. VUZ)*, 2020, No. 63 (1), pp. 153-163. DOI 10.3103/S1068799820010225. Available at: <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068799820010225>.

13. Способ подготовки гидроаэродромов для выполнения взлета и посадки гидросамолетов. Пат. №2093428, Rossiyskaya Federatsiya, №94036394/11, заявл. 29.09.1994; opubl. 20.10.1997 [Method for preparing hydroaerodromes for taking off and landing seaplanes. Patent No. 2093428, Russian Federation, No. 94036394/11, decl. 29.09.1994; publ. 20.10.1997], 4 p.
14. Многочастотное гидроакустическое приемоизлучающее антенное устройство. Пат. №104732, Rossiyskaya Federatsiya, № 2010149910/28; заявл. 03.12.2010; opubl. 20.05.2011 [Multi-frequency hydroacoustic receiving-emitting antenna device. Patent No. 104732, Russian Federation, No. 2010149910/28; decl. on 03.12.2010; publ. on 20.05.2011], 2 p.
15. *Voloshchenko V.Yu.* Гидроаэродром: повышение безопасности взлетно-посадочных действий на акватории летного бассейна [The hydro-port: improve safety of runway operations in the waters of the flight basin], *Izvestiya VUZov. Aviatsonnaya tekhnika* [Izvestiya VUZov. Aviation equipment], 2016, No. 2, pp. 108-113.
16. *Voloshchenko V.Yu., Timoshenko V.I.* Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения [Parametric hydroacoustic means of near-underwater observation] (Part 1). Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 294 p.
17. Гидроакустическая энциклопедия [Hydroacoustic Encyclopedia]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 788 p.
18. *Evyutov A.P., Lyalikov A.P., Mit'ko V.B. i dr.* Справочник по гидроакустике [Handbook of hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1982, 344 p.
19. *Kobyakov Yu.S., Kudryavtsev N.N., Timoshenko V.I.* Конструирование гидроакустической рыболовной аппаратуры [Construction of hydroacoustic fish-search equipment]. Leningrad: Sudostroenie, 1986, 272 p.
20. *Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P.* Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения (Ch. II): монография [Parametric hydroacoustic means of short-range underwater observation (Part II): monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2018, 176 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Аббасов.

Волощенко Елизавета Вадимовна – Южный федеральный университет; e-mail: voloshchenko.liza@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 89515230085; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Волощенко Вадим Юрьевич – e-mail: voloshchenko.vadim@mail.ru; тел.: 89515074541; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

Voloshchenko Elizaveta Vadimovna – Southern Federal University; e-mail: voloshchenko.liza@mail.ru; 2, Shevchenko street; phone: +79515230085; the department of hydroacoustic and medical engineering; graduate student.

Voloshchenko Vadim Yur'evich – e-mail: voloshchenko.vadim@mail.ru; phone: +79515074541; the department of engineering drawing and computer design; cand. of eng. sc.; associate professor.