

25. *Ahmadi S.* Mobile WiMAX: A systems approach to understanding IEEE 802.16 m radio access technology. Academic Press, 2010.
26. *Fedosov V., Legin A.* Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side, *Serbian journal of electrical engineering*, February 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 71-83.

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

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru, 347928, г. Таганрог, ул. Некрасовский, 44; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Джалил Садун Джамил – e-mail: jaleel.s.jameel@gmail.com; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Кучерявенко Светлана Валентиновна – e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; professor.

Jaleel Sadoon Jameel – e-mail: jaleel.s.jameel@gmail.com; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

Kucheryavenko Svetlana Valentinovna – e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru, the department of theoretical foundations of radio engineering; associate professor.

УДК 656.7, 681.88

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-18-30

Е.В. Волощенко, В.Ю. Волощенко

ВОЛНОГРАФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГИДРОУСЛОВИЙ НА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

Рассмотрены физические принципы функционирования гидроакустического волнографа, являющегося средством для измерения гидроусловий на акватории летнего бассейна. Устройство включает в себя каналы как измерения параметров морского волнения в режиме волнографа методом «обращенного» эхолота, так и обработки доплеровской информации для поиска генерального направления распространения поверхностной ветровой волны за счет наклонного эхозондирования взволнованной границы раздела со стороны дна акватории. Отличительной особенностью волнографа использование донного приемоизлучающего антенного устройства оригинальной конструкции, позволяющего осуществлять одновременное функционирование обоих каналов, причем, на нескольких рабочих ультразвуковых сигналах за счет использования эффектов нелинейной акустики – самовоздействия и самодемодуляции. Например, вследствие эффекта самовоздействия спектр зондирующего сигнала с частотой f «обогащается» высшими гармоническими составляющими с частотами $2f, 3f, \dots, nf$, где n – номер гармоники, для которых ультразвуковые поля имеют особенности – угловая ширина основного лепестка характеристики направленности в режиме излучения для каждой последующей гармоники меньше, а уровень бокового поля – ниже. Устройство может обеспечивать регистрацию параметров морского волнения (направление бега волн, высота и длина волны, период волнения) в течение длительного времени с высокой точностью, надежностью и стабильностью, что делает его перспективным для использования в составе эталонных систем.

Гидроакустический волнограф; нелинейная акустика.

E.V. Voloshchenko, V.Yu. Voloshchenko

THE WAVEGRAPH FOR HYDRO CONDITIONS MONITORING ON THE SHELF WATER AREA

The physical principles of the hydroacoustic wavegraph's operation, which is the facility for measuring of hydro conditions on the seadrome's aviation water area, are considered. The device includes channels for both measuring the parameters of sea waves in the wave recorder mode by the "inverted" echo sounder method and processing Doppler information to search for the general direction of propagation of the surface wind wave due to oblique echo sounding of the agitated interface from the bottom of the water area. A distinctive feature of the wave recorder is the use of a bottom receiving-emitting antenna assembly of an original design, which allows the simultaneous operation of both channels, moreover, on several working ultrasonic signals due to the use of nonlinear acoustics effects - self-action and self-demodulation. For example, due to the effect of self-action, the spectrum of the probing signal with a frequency is "enriched" with higher harmonic components with frequencies, where is the number of harmonics for which ultrasonic fields have features - the angular width of the main lobe of the directivity characteristic in the radiation mode for each subsequent harmonic is less, and the level of the side field - below. The device can provide registration of sea waves parameters (direction of wave movement, height and wavelength, wave period) for a long time with high accuracy, reliability and stability, which makes it promising for use as part of reference systems.

The acoustic sea wavegraph; the underwater nonlinear acoustics.

Введение. Гидросамолеты (ГС) позволяют решать специфические задачи за счет способности при заданном морском волнении и ветре к безопасному нахождению на плавучем, маневрированию на воде, взлету с воды и посадке на воду, т.е. их мореходности. Воздействие ветра на водную поверхность заключается в том, что он создает на ее поверхности давление в направлении своего движения, причем, поверхностное волнение моря может проявляться как мельчайшая рябь («капиллярные волны» с длиной менее 2 см), так и в виде длиннопериодных гравитационных волн (колебания вверх и вниз масс воды относительно среднего уровня моря) [1]. При предварительном проектировании самолетов морской авиации используется взаимосвязь мореходности ГС по ветровой гравитационной волне, его взлетной массы и взлетной (посадочной) скорости [2]

$$h = A \times m_0^{0,67} / V_B^2, \quad (1)$$

где h – мореходность, т.е. высота ветровой волны, преодолеваемой самолетом, м; m_0 – взлетная или стартовая масса ГС, т; V_B – взлетная скорость, км/ч; A – коэффициент (для винтовых самолетов 3960, для реактивных 4360). Величина мореходности h , являющаяся функцией территориально-климатических условий эксплуатации проектируемого ГС, рассчитывается на основе эмпирических данных [3–5] о параметрах морского волнения, которые, однако, были получены с применением недостаточно точного оборудования [6–8]. В настоящее время для измерения высоты волны и периода морского волнения используется ультразвуковой (УЗ) эхометод, в котором используется измерение временного запаздывания импульсных эхосигналов от горизонтальных участков как «вершин», так и «впадин» бегущей поверхностной гравитационной волны, облучаемых со стороны дна [9, 10]. В [9] описан акустический измеритель параметров волн: частота УЗ сигнала 1,16 МГц, погрешность около 1 см; угловая ширина $\theta_{0,7}=1,53^\circ$ основного лепестка характеристики направленности (ХН) электроакустического преобразователя (ЭАП) при уровне бокового поля до 20%, УЗ «пятно облучения» диаметром 1,4 м на границе раздела «вода-воздух» при излучении с глубины 50 метров, средняя ошибка высоты волн до 0,1 м. Известен [10] прибор Wave sonar канадской фирмы ASL Environmental Sciences: частота УЗ сигнала 420 кГц, ЭАП поршневого типа обеспечивает угловую ширину

$\theta_{0,7}=1,8^{\circ}$ основного лепестка ХН при уровне бокового поля до 20 %, на поверхности моря диаметр УЗ «пятна облучения» – 0,9 м, 3,1 м и 6,3 м для дистанций 30 м, 100 м и 200 м соответственно. Однако устройства [9, 10] не позволяют определять, как генеральное направление бега поверхностных волн, так и перестраивать зондирующий УЗ сигнал под изменяющиеся параметры морского волнения.

Схемное решение: режим волнографа. Гидроакустический волнограф [11, 12] содержит приемоизлучающее антенное устройство 5 (ПАУ), полусферическая поверхность которого состоит из апертур k одинаковых ЭАП 4, образующих упорядоченную систему параллелей и меридианов, причем, каждый ЭАП 4 снабжен пьезоэлементом и узлами экранировки, гидро-, электро- и шумоизоляции. ПАУ 5 расположено в водной среде 6 на донной поверхности акватории [13, 14], ЭАП 4 соединены через многоканальный управляемый коммутатор 3 с береговой аппаратурой (рис. 1, блоки, находящиеся внутри штрихового контура), состоящей из излучающего и приемного трактов.

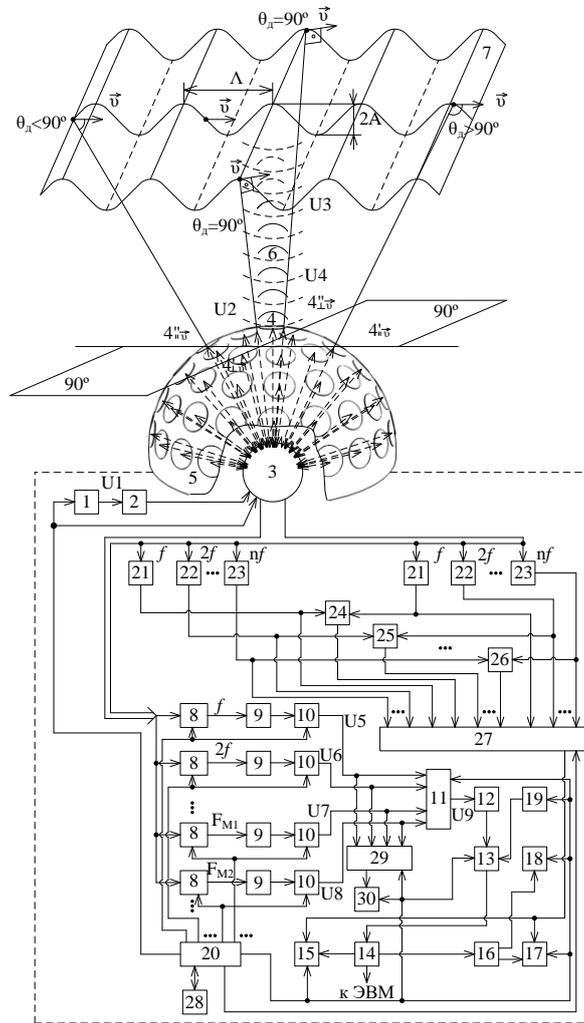


Рис. 1. Структурная схема многочастотного гидроакустического волнографа [11, 12]

Последний включает в себя каналы как измерения параметров морского волнения в режиме волнографа, так и обработки доплеровской информации для поиска генерального направления распространения поверхностной ветровой волны. По команде оператора 28 (или автоматической системы принятия решений) блок управления и настройки 20 вырабатывает синхроимпульс, поступающий на управляющий вход тактового генератора 19, причем, изменение скорости звука в водной среде δ учитывается с помощью изменения тактовой частоты его выходного сигнала. С выхода тактового генератора 19 начинают поступать импульсы на вход счетчика импульсов 13, причем, одновременно с этим с дополнительных выходов блока управления и настройки 20 поступают импульсы на управляющие входы как резонансных усилителей 8 («запирают» на время излучения и ожидания прихода эхосигнала от границы раздела), так и генератора 1, вырабатывающего радиоимпульс U_1 длительностью τ_3 с гармоническим заполнением с частотой f . Данный радиоимпульс после усилителя мощности 2 поступает через многоканальный управляемый коммутатор 3 на ЭАП 4, который, являясь составным элементом донного многочастотного ПАУ 5, излучает мощный зондирующий сигнал накачки U_2 в водную среду δ . Водная среда δ обладает нелинейностью своих упругих свойств, что приводит к возникновению при распространении импульса интенсивной U_3 волны нелинейных эффектов – самовоздействия и самодемодуляции [15], которые можно рассматривать как результат воздействия нелинейного изменения упругих свойств среды на характеристики мощного импульсного зондирующего сигнала с частотой f в области распространения.

Получение достоверной информации о параметрах морского волнения с помощью устройства в режиме волнографа обеспечивается применением для облучения границы раздела «вода-воздух» 7 не только U_3 сигнала с частотой f , но и сформировавшихся в водной среде δ акустических сигналов как высоко-, так и низкочастотного диапазонов: – высших гармонических составляющих с частотами $2f, 3f, \dots, if, \dots, nf$, где $n=2, 3, \dots, i, \dots$ – порядковый номер гармоники, и спектральных составляющих с частотами $F_{M1}=1/2\tau_3, F_{M2}=3/2\tau_3, F_{M3}=5/2\tau_3, F_{MJ}=(2j-1)/2\tau_3, F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$, где $m=1, 2, 3, \dots, j$, – порядковый номер максимума в спектре, τ_3 – длительность излученного импульса соответственно. Нелинейные эффекты в акустическом поле, формируемом ЭАП 4, позволяют разделить процессы преобразования электрической энергии в ультразвуковую (ЭАП 4) и формирования направленного излучения (участок водной среды δ , в котором взаимодействуют частотные составляющие спектра мощного импульса, соответствующие его тональному заполнению и огибающей). В результате этого при небольших поперечных размерах ЭАП 4 генерируются НЧ (самодемодуляция) и ВЧ (самовоздействие) U_3 сигналы в пределах небольших телесных углов при практически полном отсутствии бокового поля. Полигармонический зондирующий сигнал U_3 , содержащий спектральные составляющие с частотами $f, 2f, 3f, \dots, nf$, где $n=1, 2, 3, \dots, i$ – порядковый номер гармоники, и $F_{M1}=1/2\tau_3, F_{M2}=3/2\tau_3, F_{M3}=5/2\tau_3, F_{MJ}=(2j-1)/2\tau_3, F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$, где $m=1, 2, 3, \dots, j$, – после распространения в водной среде δ достигает взволнованной границы раздела «вода-воздух» 7 и отражается от нее. Отраженные составляющие полигармонического сигнала несут амплитудную, фазовую и частотную информацию об облучаемой границе раздела 7, в частности, позволяя на каждой указанной выше частоте измерять закономерность изменения удаления границы раздела «вода-воздух» 7 от ЭАП 4, входящего в состав донного ПАУ 5. Отраженный полигармонический сигнал U_4 достигает ЭАП 4, находящегося в режиме приема, который вырабатывает электрические сигналы, соответствующие указанным выше спектральным компонентам с частотами $f, 2f, 3f, \dots, if, \dots, nf$ и $F_{M1}=1/2\tau_3, F_{M2}=3/2\tau_3, F_{M3}=5/2\tau_3, F_{MJ}=(2j-1)/2\tau_3, F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$. Уровни каждого из электрических сигнала

лов определяются амплитудными ХН $R_{p,j}(\theta)$, $R_{p,2f}(\theta)$, $R_{p,3f}(\theta), \dots, R_{p,if}(\theta)$ и $R_{p,F_{M1}}(\theta)$, $R_{p,2f}(\theta)$, $R_{p,3f}(\theta), \dots, R_{p,if}$, а также чувствительностями Y_f , Y_{2f} , Y_{3f}, \dots, Y_{if} и $Y_{F_{M1}}$, $Y_{F_{M2}}, \dots, Y_{F_{Ml}}$ в режиме приема ЭАП 4 для каждой из рассеянных границей раздела «вода-воздух» УЗ волн с указанными выше частотами колебаний, где θ – угол прихода рассеянных волн, отсчитываемый от нормали к плоскости апертуры. Эффективность направленного действия ЭАП 4 в режиме приема эхосигналов в полосе частот, соответствующей указанному выше диапазону дискретных отраженных компонент сформировавшегося излучения, даже в предположении их некогерентности будет повышена, так как суммарная интенсивность есть результат энергетического суммирования интенсивностей отдельных спектральных составляющих [16]. Так, если в пределах полосы пропускания приемного тракта дискретный спектр частотных составляющих является равномерным, то общая ХН по интенсивности $R_{p,\Sigma}^2(\theta)$ представляет собой среднее арифметическое их ХН $R_{p,j,i}^2(\theta)$ для ЭАП 4 на отдельных частотных составляющих [17]

$$R_{p,\Sigma}^2(\theta) = \sum_{i=1}^{n+m} R_{p,j,i}^2(\theta) / (n+m), \quad (2)$$

где $R_{p,j,i}(\theta)$ – ХН по давлению на j , i -той частоте дискретной составляющей спектра, $(n+m)$ – общее число дискретных частотных составляющих спектра эхосигнала. На выходе $(n+m)$ канального приемного тракта обработки амплитудных характеристик дискретных частотных составляющих спектра эхосигнала после усиления (резонансные усилители 8), детектирования (детекторы 9), изменения амплитуд (аттенуаторы 10) и перемножения (перемножитель 11) выделенных видеоимпульсных сигналов $U5(f)$, $U6(2f)$, ... $U7(F_{M1})$, $U8(F_{M2})$, ... получаем результирующее напряжение $U9=U5 \times U6 \times \dots \times U7 \times U8 \dots$, соответствующее результирующему эхосигналу от облучаемой границы раздела «вода-воздух», которое подается на вход порогового устройства 12. Перемножение электрических сигналов $U5 \times U6 \times \dots \times U7 \times U8 \dots$, уровни каждого из которых пропорциональны аналогичным пространственным ХН ЭАП 4, обеспечит сохранение электрических сигналов большой амплитуды, соответствующих главным максимумам на акустической оси ЭАП 4, и ослабление электрических сигналов малой амплитуды, соответствующих добавочным максимумам для других внеосевых направлений, что эквивалентно уменьшению угловой ширины главного максимума и подавлению дополнительных максимумов в результирующей ХН ЭАП 4. Итак, в устройстве полученное видеоимпульсное напряжение $U9$, соответствующее результирующему эхосигналу от облучаемой границы раздела 7 «вода-воздух», поступает на вход порогового устройства 12, которое срабатывает в момент прихода переднего фронта сигнала и останавливает счетчик импульсов 13. Подсчитанное число тактовых импульсов заносится в запоминающий регистр 14 ЭЦВМ, выдается на цифровое табло 15, а также после цифро-аналогового преобразования в блоке 16 поступает на входы как самописца 17, так и интегратора 18. В устройстве высота волны измеряется прямым методом по временной задержке отраженного импульсного сигнала от поверхности воды, чем достигается достаточно высокая точность и достоверность измерений. Период волны измеряется в результате обработки серии экспериментальных наблюдений, полученных эхозондированием.

Схемное решение: канал обработки доплеровской информации. Много-частотный гидроакустический волнограф позволяет определять генеральное направление бега поверхностной ветровой волны, для которого Λ – длина волны

взволнованной поверхности является максимальной [12]. Поиск генерального направления бега поверхностной ветровой волны обеспечивает канал обработки доплеровской информации [18]. Для измерений используется последовательная коммутация выходов несколько пар «оппозитных» ЭАП $4'$, $4''$ расположенных на пересечениях заданной параллели и меридианов полусферической поверхности донного ПАУ 5 со входом канала обработки доплеровской информации. Акустические оси «оппозитных» пар ЭАП $4'$, $4''$ должны иметь как одинаковые углы наклона Θ_D относительно горизонта, так и находиться в одной вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии донного ПАУ 5. Коммутация осуществляется до тех пор, пока измеряемое значение доплеровской частоты для УЗ сигналов, отраженных от двух облучаемых участков взволнованной границы раздела «вода – воздух», не достигнет максимального значения. На рис.1 представлены два варианта расположения «оппозитных» ЭАП $4'$, $4''$ на полусферической поверхности донного ПАУ 5, в которых приняты обозначения с нижними индексами: 1) ($//\vec{v}$) – параллельно вектору (ЭАП

$4'_{//\vec{v}}$, ЭАП $4''_{//\vec{v}}$), 2) ($\perp \vec{v}$) – перпендикулярно вектору \vec{v} (ЭАП $4'_{\perp\vec{v}}$, ЭАП $4''_{\perp\vec{v}}$).

Очевидно, что именно первый вариант, когда вектор горизонтальной скорости \vec{v} бега поверхностной ветровой волны полностью проецируется на вертикальную плоскость, в которой лежат акустические оси обоих ЭАП $4'_{//\vec{v}}$, ЭАП $4''_{//\vec{v}}$, может обеспечить при отражении УЗ волн возникновение максимальных сдвигов их частот, обусловленных двойным эффектом Доплера. Это и есть генеральное направление бега поверхностной ветровой волны, которое может быть определено «на местности» относительно «осевого» меридиана ПАУ 5, проекция которого при установке совпадает с осью взлетно-посадочной полосы (ВПП) гидроаэродрома [13, 14]. Положение вектора горизонтальной скорости \vec{v} («туда» или «оттуда») вдоль генерального направления бега поверхностной ветровой волны (рис.1) может быть установлено за счет регистрации изменения частот принимаемых УЗ волн: 1) частота увеличена, т.е. волновой процесс приближается («оттуда», вектор скорости \vec{v} направлен к ЭАП $4''_{//\vec{v}}$ ПАУ 5), 2) частота уменьшена, т.е. волновой процесс удаляется («туда», вектор скорости \vec{v} направлен от ЭАП $4'_{//\vec{v}}$ ПАУ 5). Акустические оси обоих ЭАП $4'_{//\vec{v}}$, ЭАП $4''_{//\vec{v}}$ имеют одинаковые углы наклона Θ_D относительно горизонта и находятся в одной вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии донного ПАУ 5. Оба ЭАП $4'_{//\vec{v}}$, ЭАП $4''_{//\vec{v}}$ соединены через многоканальный управляемый коммутатор 3 с излучающим трактом аппаратуры – генератором 1 и усилителем мощности 2 (рис. 1). УЗ волны, которые распространяются в направлении двух выбранных участков границы раздела 7 (рис. 1) «вода-воздух», формируют в водной среде 6 две параметрические излучающие антенны (ПИА) (самовоздействие), в объемах которых генерируются два полигармонических пучка ультразвуковых сигналов с частотами $f, 2f, 3f, \dots, if, \dots, nf$, где $n=1, 2, 3, \dots, i, \dots$ – порядковый номер гармоники. При отражении УЗ волн возникновение сдвигов их частот обусловлено двойным эффектом Доплера (рис. 1), так как относительно выбранного ПАУ на первом участке – волновой процесс приближается (частота увеличена), а на втором – удаляется (частота уменьшена). Отраженные колебания поступают на ЭАП $4'_{//\vec{v}}$, ЭАП $4''_{//\vec{v}}$, выходы которых через многоканальный управляемый коммутатор 3 и резонансные усилители 21, 22, ..., 23, настроенные на частоты $f, 2f, \dots, nf$, соединены с двумя входами n частотных дискриминаторов 24, 25, ..., 26. На оба входа последних подаются электрические сигналы парами одного как частотного диапазона, так и доплеровского сдвига (но с разными знаками – «+» и «-»)

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(f) &= f \left(1 + \frac{2v \cdot \cos \Theta_{\text{д}}}{c} + \frac{2v^2 \cdot \cos^2 \Theta_{\text{д}}}{c^2} + \dots \right), \\
 f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(f) &= f \cdot \left(1 - \frac{2v \cdot \cos \Theta_{\text{д}}}{c} + \frac{2v^2 \cdot \cos^2 \Theta_{\text{д}}}{c^2} + \dots \right); \\
 f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(nf) &= nf \cdot \left(1 + \frac{2v \cdot \cos \Theta_{\text{д}}}{c} + \frac{2v^2 \cdot \cos^2 \Theta_{\text{д}}}{c^2} + \dots \right), \\
 f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(nf) &= nf \cdot \left(1 - \frac{2v \cdot \cos \Theta_{\text{д}}}{c} + \frac{2v^2 \cdot \cos^2 \Theta_{\text{д}}}{c^2} + \dots \right).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

В частотных дискриминаторах 24, 25, ..., 26 происходит перемножение поступающих n пар электрических сигналов, а затем выделение n низкочастотных компонент, которые пропорциональны на частотах $f, 2f, \dots, nf$ n значениям горизонтальной скорости \vec{v} бега поверхностной ветровой волны.

Таким образом, частотные дискриминаторы 22, 23, ... 24 вырабатывают n гармонических электрических сигналов с частотами $f_{D(nf)4^*_{\vec{v}}, 4^{**}_{\vec{v}}} = f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(nf) - f_{\text{ЭАП}^*_{\vec{v}}}(nf) = 4nf v_{(nf)} \cdot \cos \Theta_{\text{д}} / c$, которые пропорциональны значениям горизонтальной скорости $\vec{v}_{(nf)}$ бега поверхностной ветровой волны. Откуда, на частотах $f, 2f, 3f, \dots, nf$ можно вычислить n значений горизонтальной скорости \vec{v} бега поверхностной ветровой волны относительно поверхности дна по формуле

$$v_{(nf)} = \frac{c \cdot f_{D(nf)4^*_{\vec{v}}, 4^{**}_{\vec{v}}}}{4nf \cdot \cos \Theta_{\text{д}}}.
 \tag{4}$$

Выходы как частотных дискриминаторов 24, 25, ..., 26, так и резонансных усилителей 21, 22, ..., 23, настроенных на частоты $f, 2f, \dots, nf$, соединены со входами блока вторичной обработки доплеровской информации 27. В блоке 27 осуществляется: 1) алгебраическое суммирование частот сигналов с доплеровскими сдвигами, принятых ЭАП $4^I, 4^{II}$ для каждой гармоники с частотами $f, 2f, \dots, nf$ в отдельности, 2) измерение значений полученных наборов доплеровских частот, 3) переход от значений полученных наборов доплеровских частот к значениям горизонтальной скорости $\vec{v}_{(nf)}$ бега поверхностной ветровой волны, 4) преобразование полученной информации в код индикаторных элементов и индикация значений и т.д. [16, 18]. Данная информация с выхода блока 27 по команде оператора (или автоматической системы принятия решений) 28, поступающей через блок управления и настройки 20 на управляющий вход блока 27, выводится на цифровое табло 15 и самописец 17.

Оценка погрешности измерений. Точность измерения ординат волны в ее «вершине» и «подошве» близка к разрешающей способности как в вертикальном (длительность зондирующего импульса), так и горизонтальном (угловая ширина по уровню 0,7 главного максимума ХН) направлениях, а на склонах – определяется протяженностью «пятна облучения». Повышение точности измерений в режиме волнографа можно осуществить при реализации многоканального приемного тракта, воплощающего подход к обработке эхосигналов спектральных составляющих, описанный соотношением (2). Таким образом, выбор набора регистрируемых частот эхосигналов и алгоритм обработки в многоканальном приемном тракте устройства позволит регулировать основные параметры в приеме обратимого ЭАП 4: остроту направленного действия, угловую ширину главного максимума, число,

направления и величину дополнительных максимумов ХН. При функционировании устройства в режиме волнографа передний фронт видеоимпульсного напряжения $U_9 = U_5 \times U_6 \times \dots \times U_7 \times U_8 \dots$, соответствующего результирующему эхосигналу от облучаемой границы раздела 7 «вода-воздух», используется как характерный признак поступления отраженной от границы раздела «вода-воздух» посылки. Воздействие импульса гармонического колебания с частотой, равной собственной частоте избирательной системы (например, на резонансный усилитель 8) приводит к возникновению переходных процессов, проявляющихся в «затягивании» переднего и заднего фронтов. Так, выходной сигнал описывается следующим выражением $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \kappa \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \sin \omega_0 t$, где κ – коэффициент усиления для сигнала, $\alpha = 2\pi \cdot \Delta f$ – постоянная времени системы. Возникновение запаздывания в формировании огибающей установившегося импульсного выходного сигнала (передний фронт) приводит к появлению аппаратного времени задержки, которое добавляется ко времени пробега измеряемого расстояния УЗ волнами и может вносить погрешность в результаты измерений. Аппаратное время задержки определяется совместным действием двух факторов – полосой пропускания Δf тракта и уровнем дискриминации сигнала при его детектировании. В эхо-импульсных устройствах уровень дискриминации вводится в приемный тракт для исключения ложных показаний устройства при наличии внешних гидроакустических и других помех, для фиксации информативного сигнала необходимо его превышение над установленным порогом дискриминации, причем, увеличение амплитуды информативного сигнала приводит к уменьшению аппаратного времени запаздывания. Для возможно большего ослабления флуктуаций аппаратного времени задержки, определяющего величину погрешности проводимых измерений, необходимо как уменьшать порог дискриминации, так и увеличивать уровень полезного информативного сигнала. В устройстве именно использование полигармонического зондирующего УЗ сигнала, содержащего как низкочастотные, так и высокочастотные спектральные составляющие, может позволить снизить величину аппаратного времени запаздывания при увеличении уровня результирующего информативного сигнала за счет перемножения. Обозначив относительный уровень дискриминации $\varepsilon = U_{\text{д}} / U_{\text{вых.уст}}$, где $U_{\text{д}}$ – абсолютный уровень дискриминации; $U_{\text{вых.уст}}$ – установившаяся амплитуда выходного сигнала, а также $\varepsilon = U_{\text{д}} / \kappa \cdot U_{\text{вх}}$, запишем выражение для аппаратного времени задержки $\tau_a = [-1 / (2\pi \cdot \Delta f)] \times \ln(1 - U_{\text{вых.уст}} \cdot \varepsilon / U_{\text{д}})$. Приведем расчетные значения как времени аппаратного запаздывания (мксек), так и соответствующего дополнительного расстояния (см) до отражающей границы раздела при относительных уровнях дискриминации 0,5; 0,3; 0,1 от установившейся величины сигнала U_9 : 220 мксек и 16,3 см; 114 мксек и 8,1 см; 33 мксек и 2,4 см.

Различную точность отображения рельефа взволнованной границы раздела «вода-воздух» с использованием (n) и (m) каналов обработки амплитудных характеристик эхосигналов ВЧ (самовоздействие) и НЧ (самодемодуляция) приемного тракта устройства. Например, по границе раздела со скоростью v бежит гравитационная волна, у которой облучаются снизу две соседние «впадины» профиля одинаковой величины, расположенных на расстоянии Λ и разделенных размахом ($2A$ – двойная амплитуда) волнового процесса (рис.1), отметки, от которых на волнограмме могут сливаться в одну, что может привести к неработоспособности устройства. Рассчитаем величину угла $\Delta\theta$, при отклонении на который в области главного максимума ХН ЭАП 4, оператор 28 уверенно зафиксирует уменьшение амплитуды сигнала от каждой из соседних «впадин» профиля одинаковой величины, т.е. они будут зарегистрированы отдельно с определенной точностью отображения волнового профиля на границе раздела

«вода-воздух». Величиной этого угла $\Delta\theta$ характеризуют точность пеленгования, например, для максимального метода пеленгования $\Delta\theta = 0,6 \cdot \sqrt{\mu} \cdot \theta_{0,7}$, где μ – коэффициент, величина которого при использовании оператором 28 визуального индикатора, составляет (0,05- 0,15); для слухового индикатора - $\geq 0,2$. Оценим точность максимального метода пеленгования НЧ и ВЧ амплитудными трактами макета параметрического гидролокатора ближнего действия [11], который может быть использован в режиме волнографа. В данном устройстве угловая ширина главного максимума результирующих ХН приемно-излучающей системы по уровню 0,7 составляет: ВЧ канал – при предлагаемой обработке сигналов $f_+ = 476$ кГц, $2f_1 = 456$ кГц, $2f_2 = 496$ кГц – $\theta_{0,7\text{ВЧрез}} = 1,6^0$ при отсутствии боковых лепестков; НЧ канал – для сигнала разностной частоты $F = 20$ кГц $\theta_{0,7\text{НЧрез}} = 6,4^0$ при наличии боковых лепестков с уровнями до 13%. Это должно обеспечить при вертикальном лоцировании с донного ПАУ 5, расположенного на глубине 20 метров, следующие величины разрешающей способности по углу $D_{\text{ВЧрез}} \sim 0,2$ м и $D_{\text{НЧ}} \sim 0,8$ м соответственно. В данном случае при визуальном пеленговании соседних «впадин» профиля одинаковой величины оператором 28 ($\mu = 0,1$) с помощью данной локационной системы точность пеленгования $\Delta\theta$ будет составлять: для ВЧ тракта при предлагаемой обработке – $\Delta\theta_{\text{ВЧрез}} = 0,28^0$; для НЧ тракта на сигнале разностной частоты $F = 20$ кГц – $\Delta\theta_{\text{НЧ}} = 1,3^0$.

Измерения характеристик излучающего тракта волнографа. Рассмотрим результаты испытаний рыбопоисковой аппаратуры (РПА) серии «Сарган» в штатных режимах, мощность излучения обратимой интерференционной антенны которой достаточна для формирования полигармонического зондирующего сигнала как с высокочастотными (самовоздействие), так и низкочастотными (самодемодуляция) спектральными составляющими. Двухчастотная интерференционная антенна РПА «Сарган-К» позволяет излучать в водную среду акустический сигнал основной частоты $f = 19,7$ кГц или 135 кГц, причем, предусмотрена возможность облучения разных по величине водных объемов (режимы «Широкая диаграмма направленности (ДН)» и «Узкая диаграмма направленности (ДН)») на каждой из данных частот за счет электрического возбуждения как центральной части, так и всех пьезоэлементов, составляющих поршневую апертуру. В [19] представлены экспериментальные данные по пространственным характеристикам акустических полей для сигнала основной частоты и его высших гармоник, формирующихся в воде: 1) антенна РПА «Сарган-К» в режиме «Широкая ДН» имеет: на частоте $f = 135$ кГц угловую ширину $\theta_{0,7(f)} = 4,7^0$ главного максимума ХН и уровень бокового излучения $P_{\text{БП}(f)} = (-15,5$ дБ); на частоте $2f = 270$ кГц – $\theta_{0,7(2f)} = 3,2^0$ и $P_{\text{БП}(2f)} = (-20$ дБ); на частоте $3f = 405$ кГц – $\theta_{0,7(3f)} = 2,8^0$ и $P_{\text{БП}(3f)} = (-50$ дБ); 2) антенна РПА «Сарган-К» в режиме «Узкая ДН» имеет: на частоте $f = 135$ кГц угловую ширину $\theta_{0,7(f)} = 2,1^0$ главного максимума ХН и уровень бокового излучения $P_{\text{БП}(f)} = (-9$ дБ); на частоте $2f = 270$ кГц – $\theta_{0,7(2f)} = 1,7^0$ и $P_{\text{БП}(2f)} = (-16$ дБ); на частоте $3f = 405$ кГц – $\theta_{0,7(3f)} = 1,3^0$ и $P_{\text{БП}(3f)} = (-33$ дБ). Антенна комплекса «Сарган-К» в режиме излучения низкочастотного сигнала имеет: на частоте $f = 19,7$ кГц угловую ширину $\theta_{0,7(f)} = 16^0$ главного максимума ХН и уровень бокового излучения $P_{\text{БП}(f)} = (-13$ дБ); на частоте $2f = 39,4$ кГц – $\theta_{0,7(2f)} = 11,7^0$ и $P_{\text{БП}(2f)} = (-20$ дБ); на частоте $3f = 59,1$ кГц – $\theta_{0,7(3f)} = 9,6^0$ и $P_{\text{БП}(3f)} = (-28$ дБ).

Оценим динамику изменения помехоустойчивости χ ЭАП 4 в режиме приема, входящего в состав донного ПАУ 5, характеризующей его способность в силу пространственной избирательности выделять информативный сигнал с частотой $f, 2f, 3f, \dots if, \dots nf$ используемой спектральной компоненты полигармонического эхосигнала от взволнованной границы раздела «вода-воздух» на фоне помех. Итак, помехоустойчивость χ определяется отношением как

мощностей P_c , P_n сигнала и помех на выходе преобразователя, так и интенсивностей сигнала и помехи I_c , I_n , измеренных в месте нахождения преобразователя при условии его отсутствия, а также его коэффициентом осевой концентрации K_0 для направления $\theta=0$, которое в нашем случае совпадает с вертикально стабилизированной в пространстве акустической осью ХН $\chi = P_c/P_n = (I_c/I) \times K_0$. Известно эмпирическое соотношение [20], позволяющее осуществить приближенный расчет коэффициента концентрации $K_0 = 41300/\theta_{0,5}^2$, причем, как следует из приведенных выше данных величина знаменателя уменьшается с ростом частоты f , $2f$, $3f, \dots, if, \dots, nf$ спектральной составляющей, т.е. увеличивается как коэффициент концентрации K_0 , так и помехоустойчивость χ .

Выводы. Специфические условия эксплуатации гидроакустического волнографа определяются непрерывным изменением формы отражающей поверхности границы раздела 7 и расстояния до нее. Положение отражающей поверхности «вода-воздух» 7 меняется от горизонтального для «вершины» или «впадины» до крутонаклонного на ее скатах, причем, основной составляющей принимаемого полигармонического сигнала является сигнал зеркального отражения от горизонтальных участков поверхности 7. Предположим, что длина горизонтального участка взволнованной отражающей границы раздела «вода-воздух» – «вершины» или «впадины» гравитационной волны – приблизительно составляет $\Lambda/14$, причем, этому участку «облучения» соответствует угол $\Delta\theta_{MAX(f_i, F_j)}$ – острота максимума основного лепестка ХН, в пределах которого каналы приемного тракта устройства нечувствительны к изменению уровней ($\sqrt{0,2} \approx 0,447$) эхосигналов на используемых спектральных компонентах с частотами f , $2f$, $3f, \dots, if, \dots, nf$ и $F_{M1}=1/2\tau_3$, $F_{M2}=3/2\tau_3$, $F_{M3}=5/2\tau_3$, $F_{Mj}=(2j-1)/2\tau_3$, $F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$. Учитывая, что острота максимума $\Delta\theta_{MAX(f_i, F_j)}$ основного лепестка ХН плоского поршневого ЭАП 4 на данных сигналах описывается соотношением $\Delta\theta_{MAX(f_i, F_j)} = 0,64 \times \sqrt{0,2} \times \lambda_{f_i, F_j} / d$, где d – диаметр преобразователя [17], данные величины можно связать соотношением $\Lambda/14 = (0,64 \times \sqrt{0,2} \times \lambda_{f_i, F_j} / d) \times z$, где z – глубина расположения ЭАП 4 относительно границы раздела. Исходя из этого соотношения можно для заданных глубин z расположения антенны РПА «Сарган» («обращенный» эхолот) рассчитать диапазон минимальных длин гравитационных волн, «оптимально» регистрируемых методом прямого счета на определенной спектральной составляющей зондирующего полигармонического сигнала. Так, для $z=100$ м при использовании модернизированной антенны «Сарган-ЭМ» (диаметр $d=0,5$ м) спектральным составляющим 40 кГц, 60 кГц, 135 кГц, 270 кГц и 405 кГц соответствуют «оптимально» регистрируемые минимальные длины гравитационных волн Λ – 30 м, 20 м, 8,9 м, 4,5 м и 3 м, которые распространяются со скоростями 6 м/с, 5 м/с, 3 м/с, 2 м/с и 1,6 м/с (расчет) соответственно. Итак, с глубины 100м – на спектральной составляющей 405 кГц наиболее оптимально можно регистрировать параметры морского волнения с длинами волн от 3 метров и более (точность отображения взволнованной границы раздела «вода-воздух» $\sim 0,53^0$); на спектральной частоте 270 кГц наиболее оптимально можно регистрировать параметры морского волнения с длинами волн от 4,5 метров и более (точность отображения взволнованной границы раздела «вода-воздух» $\sim 0,6^0$); на спектральной частоте 135 кГц наиболее оптимально можно регистрировать параметры морского волнения с длинами волн от 8,9 метров и более (точность отображения взволнованной границы раздела «вода-воздух» $\sim 0,9^0$) и т.д.

Таким образом, рассмотренный многочастотный гидроакустический волнограф [11, 12] имеет расширенные эксплуатационные возможности, позволяя получать достоверную информацию о гидроусловиях на акватории в значительном диапазоне изменения их величин, за счет оптимизации характеристик зондирующего ультразвукового поля, в соответствии с изменяющимися параметрами морского волнения, в частности, обеспечивая повышение точности и приводя к регистрации уточненных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
2. Кобзев В.А., Фортинов Л.Г. Инновационный подход к синтезу облика океанского патрульного гидросамолета при предварительном проектировании // Сб. докладов VIII научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010». – М.: ЦАГИ, 2010. Ч. 1. – С. 26-34.
3. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. – Л.: Транспорт, 1974. – 335 с.
4. Коровин В.П., Тимец В.М. Методы и средства гидрометеорологических измерений: учеб. пособие. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 310 с.
5. Коровин В.П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. – 434 с.
6. Акустический способ определения высоты морских вол. А.с. № 412578, СССР, №1705438/18-10; заявл. 13.10.1971, опубл. 5.01.1974. – 24 с.
7. Способ измерения характеристик взволнованной водной поверхности. Пат. № 2466425, Российская Федерация, №2011123364/28, заявл. 01.06.2011, опубл. 20.11.2012. – 12 с.
8. Гидроакустический автономный волнограф. Пат. № 2011132211, Российская Федерация, №2011132211/28; заявл. 29.07.2011, опубл. 10.02.2013. – 12 с.
9. Греков А.Н., Васильев Д.М., Котов М.Н. Акустический измеритель параметров волн // Системы контроля окружающей среды. – 2006. – Вып. 09. – С. 51-56.
10. Fissel D.B., Birch J.R., Borg K., Melling H. Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application // In Proc. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3-6 May 1999, www.aslenv.com. – 9 с.
11. Акустический волнограф: Пат. № 168083, Российская Федерация, №2016108213; заявл. 09.03.2016.; опубл. 17.01.2017. – 24с.
12. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения. Пат. № 2721307 Российская Федерация, №2019124489, заявл. 01.08.2019, опубл. 18.05.2020. – 48 с.
13. Волощенко В.Ю. Гидроаэродром: повышение безопасности взлетно-посадочных действий на акватории летного бассейна // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2016. – № 2. – С. 108-113.
14. Волощенко В.Ю. Гидроаэродром: технологии комплексной навигации беспилотных гидросамолетов на акватории летного бассейна // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2018. – № 1. – С. 97-105.
15. 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.
16. Система многочастотного акустического зондирования. Пат. № 108642, Российская Федерация, №2011122973/28; заявл. 07.06.2011, опубл. 20.09.2011. – 2с.
17. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
18. System and method for measuring wave directional spectrum and wave height. Пат. 20080094940 США, МКИ G01s 15/58 / Brumley et al (США), Teledyne RD Instruments (США) №11/959377; заявл. 18.12.2007; опубл. 24.04.2008; НКИ 367/90. – 35 с.
19. Волощенко В.Ю., Волощенко А.П. Параметрические гидроакустические средства ближнего подводного наблюдения. Ч. 2. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 176 с.
20. Зарайский В.А., Тюрин А.М. Теория гидролокации. – Л.: Военно-морская орденов Ленина и Ушакова академия, 1975. – 604 с.

REFERENCES

1. *Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.
2. *Kobzev V.A., Fortinov L.G.* Innovatsionnyy podkhod k sintezu oblika okeanskogo patrol'nogo gidrosamoleta pri predvaritel'nom proektirovani [An innovative approach to the synthesis of the appearance of an ocean patrol seaplane during preliminary design], *Sb. dokladov VIII nauchnoy konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviatsalon-2010»* [Collection of reports of the VIII Scientific conference on hydroaviation "Hydroaviatsalon-2010"]. Moscow: TSAGI, 2010. Part 1, pp. 26-34.
3. *Veter i volny v okeanakh i moryakh.* Spravochnye dannye [Wind and waves in the oceans and seas. Reference data]. Leningrad: Transport, 1974, 335 p.
4. *Korovin V.P., Timets V.M.* Metody i sredstva gidrometeorologicheskikh izmereniy: ucheb. posobie [Methods and means of hydrometeorological measurements: a textbook]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000, 310 p.
5. *Korovin V.P.* Okeanologicheskie nablyudeniya v pribrezhnoy zone morya: ucheb. posobie [Oceanological observations in the coastal zone of the sea: a textbook]. Saint Petersburg: Izdvo RGGMU, 2007, 434 p.
6. Akusticheskiy sposob opredeleniya vysoty morskikh voln. A.s. № 412578, SSSR, №1705438/18-10; zayavl. 13.10.1971, opubl. 5.01.1974 [Acoustic method for determining the height of sea waves. A.S. No. 412578, USSR, No. 1705438/18-10; decl. 13.10.1971, publ. 5.01.1974], 24 p.
7. Sposob izmereniya kharakteristik vzvolnovannoy vodnoy poverkhnosti. Pat. № 2466425, Rossiyskaya Federatsiya, №2011123364/28, zayavl. 01.06.2011, opubl. 20.11.2012 [A method for measuring the characteristics of an agitated water surface. Patent No. 2466425, Russian Federation, No. 2011123364/28, decl. 01.06.2011, publ. 20.11.2012], 12 p.
8. Gidroakusticheskiy avtonomnyy volnograf. Pat. № 2011132211, Rossiyskaya Federatsiya, №2011132211/28; zayavl. 29.07.2011, opubl. 10.02.2013 [Hydroacoustic autonomous wave detector. Patent No. 2011132211, Russian Federation, No. 2011132211/28; decl. on 29.07.2011, publ. on 10.02.2013], 12 p.
9. *Grekov A.N., Vasil'ev D.M., Kotov M.N.* Akusticheskiy izmeritel' parametrov voln [Acoustic wave parameter meter], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental monitoring systems], 2006, Issue 09, pp. 51-56.
10. *Fissel D.B., Birch J.R., Borg K., Melling H.* Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application, *In Proc. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3-6 May 1999*, www.aslenv.com, 9 p.
11. Akusticheskiy volnograf: Pat. № 168083, Rossiyskaya Federatsiya, №2016108213; zayavl. 09.03.2016.; opubl. 17.01.2017 [Acoustic wave detector: Patent No. 168083, Russian Federation, No. 2016108213; declared on 09.03.2016.; publ. 17.01.2017], 24 p.
12. Akusticheskiy sposob i ustroystvo izmereniya parametrov morskogo volneniya. Pat. № 2721307 Rossiyskaya Federatsiya, №2019124489, zayavl. 01.08.2019, opubl. 18.05.2020 [Acoustic method and device for measuring the parameters of sea waves. Patent No. 2721307 Russian Federation, No. 2019124489, decl. 01.08.2019, publ. 18.05.2020], 48 p.
13. *Voloshchenko V.Yu.* Gidroaerodrom: povyshenie bezopasnosti vzletno-posadochnykh deystviy na akvatorii letnogo basseyna [The hydro-port: improve safety of runway operations in the waters of the flight basin], *Izvestiya VUZov. Aviatsionnaya tekhnika* [Izvestiya VUZov. Aviation equipment], 2016, No. 2, pp. 108-113.
14. *Voloshchenko V.Yu.* Gidroaerodrom: tekhnologii kompleksnoy navigatsii bespilotnykh gidrosamoletov na akvatorii letnogo basseyna [The hydro-port: the technology of the integrated navigation of unmanned seaplane on the waters of the flight basin], *Izvestiya VUZov. Aviatsionnaya tekhnika* [Izvestiya VUZov. Aviation equipment], 2018, No. 1, pp. 97-105.
15. *Myuir T.Dzh.* Nelineynaya akustika i ee rol' v geofizike morskikh osadkov [Nonlinear acoustics and its role in Geophysics marine sediments], *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics of marine sediments]: trans. from engl., ed. by Yu.Yu. Zhitkovskogo. Moscow: Mir, 1977, pp. 227-273.
16. Sistema mnogochastotnogo akusticheskogo zondirovaniya. Pat. № 108642, Rossiyskaya Federatsiya, №2011122973/28; zayavl. 07.06.2011, opubl. 20.09.2011 [Multi-frequency acoustic sounding system. Patent. No. 108642, Russian Federation, No. 2011122973/28; decl. 07.06.2011, publ. 20.09.2011], 2 p.

17. *Evyutov A.P., Mit'ko V.B.* Inzhenernye raschety v gidroakustike [Engineering calculations in hydroacoustics]. 2nd ed. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 288 p.
18. System and method for measuring wave directional spectrum and wave height. Patent 20080094940 SSHA, MKI GO1s 15/58 / Brumley et al (SSHA), Teledyne RD Instruments (SSHA) No. 11/959377; decl. 18.12.2007; publ. 24.04.2008; NKI 367/90, 35 p.
19. *Voloshchenko V.Yu., Voloshchenko A.P.* Parametricheskie gidroakusticheskie sredstva blizhnego podvodnogo nablyudeniya [Parametric hydroacoustic means of near underwater observation]. Part 2. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2018, 176 p.
20. *Zarayskiy V.A., Tyurin A.M.* Teoriya gidrolokatsii [Theory of sonar]. Leningrad: Voenno-morskaya ordenov Lenina i Ushakova akademiya, 1975, 604 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, Taganrog, 347922, Russia; 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.

УДК 621.391.372

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-30-40

П.А. Дятлов, Б.Х. Кульбикаян

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫНОСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ В ПОЛУАКТИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Рассматриваются вопросы повышения помехозащищенности полуактивных радиолокационных систем, основанных на использовании передатчиков подсвета целей с помощью гармонического излучения и выносных доплеровских приемников совместно с центральным постом обработки информации. Данное решение является не только наиболее простым с точки зрения аппаратурной реализации, но и имеет такие достоинства, как высокое быстродействие и повышенная чувствительность, а также возможность беспроблемной пространственной и частотной обработки излучений. Из недостатков следует отметить малую скрытность функционирования данной полуактивной радиолокационной системы. Целью работы является устранение указанного недостатка за счет использования перестройки частоты в передатчике подсвета или при использовании в полуактивной радиолокационной системе нескольких пространственно-разнесенных передатчиков подсвета, работающих по заданной частотно-временной схеме. Кроме того, в работе рассматриваются вопросы оптимизации основных параметров выносных доплеровских приемников полуактивных радиолокационных систем. В частности, в работе даются рекомендации для уменьшения слепящего действия прямого сигнала на доплеровский приемник и представлен комплекс мер, направленных на увеличение дальности действия полуактивных радиолокационных систем до сорока километров. В данной работе рассматривается случай работы полуактивной радиолокационной системы, функционирующей в ограниченном