

Гидроакустическое устройство профилирования донного грунта с синтезированной апертурой

А. В. Вагин[✉], А. С. Воротынцева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] av.vagin@bk.ru

Аннотация

Введение. Акустическое профилирование является традиционным методом исследования геологического строения морского дна. Для этих целей используется низкочастотный акустический профилограф с рабочим диапазоном частот 1...14 кГц. Однако при понижении рабочих частот возникает проблема с достижением необходимой разрешающей способности. Проблема повышения углового разрешения гидроакустического устройства, или, иначе говоря, повышение разрешающей способности в направлении движения носителя, является одной из приоритетных задач при поиске и обнаружении объектов на морском дне, исследовании структуры донного грунта. Существует несколько способов повышения углового разрешения, одним из которых является алгоритм синтеза апертуры антенны, базирующийся на использовании закона изменения фазы отраженного сигнала, что является актуальным при проектировании гидроакустических средств высокого разрешения.

Цель работы. Показать возможность построения устройства профилирования донного грунта, а также возможность повышения углового разрешения на основе алгоритма синтеза апертуры антенны акустического профилографа.

Материалы и методы. Исследование возможности построения устройства профилирования донного грунта с использованием алгоритма синтеза апертуры антенны основано на заделе, полученном для гидролокаторов бокового обзора с синтезированной апертурой в части построения антенного устройства, а также на методах возбуждения радиоволн, разработанных для радиолокационных систем.

Результаты. Исследована возможность применения синтеза апертуры антенны для акустического профилографа донного грунта. Рассмотрен алгоритм синтеза апертуры антенны, а также фазовые искажения траекторного сигнала и их влияние на гидролокационное изображение, а также основы обработки траекторного сигнала.

Заключение. В работе предложен вариант повышения разрешающей способности акустического профилографа при выполнении поисково-обследовательских задач. Предлагаемый вариант построения акустической части устройства профилирования может быть использован при разработке поисково-обследовательских гидроакустических устройств с высоким угловым разрешением.

Ключевые слова: профилограф, характеристика направленности, антенна, апертура

Для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Гидроакустическое устройство профилирования донного грунта с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 78–86. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-78-86

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Статья поступила в редакцию 19.09.2022; принята к публикации после рецензирования 23.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2023



Hydroacoustic Bottom Soil Profiling Device with Synthetic Aperture

Anton V. Vagin , Alena S. Vorotyntseva

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

 av.vagin@bk.ru

Abstract

Introduction. Acoustic profiling is a conventional method for studying the geological structure of the seabed. To this end, a low-frequency acoustic profiler with an operating frequency range of 1...14 kHz can be used. However, under lower operating frequencies, the difficulty of achieving the required resolution arises. The problem of improving the angular resolution of a hydroacoustic device, particularly in the direction of the carrier movement, remains to be a priority task in the search and detection of objects on the seabed, as well as the study of the bottom soil structure. Angular resolution can be improved through several approaches, including an algorithm for synthesizing the antenna aperture based on the law of the phase change of the reflected signal. This approach is relevant in the design of high-resolution hydroacoustic tools.

Aim. To demonstrate the possibility of constructing a bottom soil profiling device, as well as the possibility of increasing its angular resolution based on an algorithm for synthesizing the antenna aperture of an acoustic profiler.

Materials and methods. The study employed the groundwork data obtained for side-scan sonars with a synthetic aperture in terms of constructing an antenna device and the methods of radio-wave excitation developed for radar systems.

Results. The possibility of synthesizing the antenna aperture for an acoustic profiler of the bottom soil was studied. An algorithm for synthesizing the antenna aperture was investigated along with phase distortions of the trajectory signal and their influence on the sonar image. The fundamental principles of processing the trajectory signal were considered.

Conclusion. An approach to increasing the resolution of an acoustic profiler when performing search and survey tasks is proposed. The proposed design of the acoustic part of a profiling device can be used in the development of search and survey hydroacoustic devices with a high angular resolution.

Keywords: profiler, directional characteristic, antenna, aperture

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Hydroacoustic Bottom Soil Profiling Device with Synthetic Aperture. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 78–86. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-78-86

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 19.09.2022; accepted 23.01.2022; published online 28.02.2023

Введение. В настоящее время одним из важных направлений развития поисково-обследовательских гидроакустических средств является решение задачи обнаружения объектов на морском дне, находящихся под слоем осадков, а также особый интерес представляет исследование структуры донного грунта и классификация осадочных пород. Задачи по обеспечению поиска "заиленных объектов" можно решать с помощью применения гидролокатора бокового обзора (ГБО) с использованием низких рабочих частот (в несколько килогерц). Но, как показано в [1], глубина проникновения акустических волн в илистый грунт составляет порядка нескольких метров, а для

глинистых и песчаных грунтов вследствие значительного коэффициента поглощения глубина проникновения имеет еще меньшее значение. В этой связи применение ГБО для решения подобных задач недостаточно эффективно.

Как показано в [2], оптимальным устройством для поиска объектов, погруженных в грунт, является гидроакустическое средство – устройство профилирования (профилограф), которое обеспечивает эффективный поиск заиленных объектов на глубине грунта в несколько десятков метров, а также решает задачи исследования строения донного грунта, деления (т. е. выявления границ в толще грунта) и классификации осадочных пород.

Принцип действия устройства профилирования основывается на принципе работы эхолота – осуществляется излучение акустического зондирующего сигнала, который распространяется в направлении дна. Поскольку слои донного грунта имеют разную плотность, значение амплитуды отраженного сигнала от каждого слоя будет отличаться в соответствии с их отражающей способностью, определяемой некоторым коэффициентом, характерным для каждого слоя донного грунта. После отражения сигнала донными структурами осуществляется прием импульсов, которые поступают на регистрирующее устройство в виде эхотрассы. В результате эхолокационное изображение, получаемое при работе профилографа, представляет собой поперечный разрез грунта, представленный по координатам "глубина – дальность", где получение данных по первой координате обусловлено распространением зондирующего сигнала, а по координате "дальность" – за счет движения носителя устройства [3].

В гидроакустической технике важно обеспечить точность (детальность) получаемого эхолокационного изображения. Повышение точности классификации морского грунта, а также обнаружения погруженных в грунт объектов обеспечивается оптимизацией обработки принимаемого сигнала с целью увеличения отношения сигнал-помеха, что может быть реализовано при использовании фильтров с оптимальными частотными и импульсными характеристиками, а также при помощи разработки эффективных антенных устройств. Так, в [4–7] предлагаются различные методы по улучшению конструктивного исполнения антенного устройства и оптимизации обработки сигнала для получения эхолокационных изображений высокого разрешения.

Таким образом, важнейшим решением является разработка оптимальных алгоритмов обнаружения и обнаружителей, реализующих эти алгоритмы. Одним из таких решений является использование антенн с синтезированной апертурой (СА). Как показано в [1], применение низких частот, необходимых для достаточного проникновения зондирующего сигнала в морской грунт с сохранением требуемой пространственной разрешающей способности,

обеспечивается при использовании метода синтеза апертуры антенны.

Данный метод еще с 1970-х годов получил распространение в радиолокационных системах. В [8] отмечено, что использование СА позволяет обеспечить высокую угловую (азимутальную) разрешающую способность при максимально возможной дальности действия. В последствии метод синтеза антенной апертуры, широко исследуемый в 80-х и 90-х годах прошлого столетия, распространился и на область гидролокации. Так, несколько работ [9–12] посвящены ГБО с СА. В [9] отражен алгоритм формирования СА, который основан на использовании закона изменения фазы отраженного сигнала при известном относительном движении наблюдаемой цели и фазового центра антенны (ФЦА). Необходимо учитывать тот факт, что при работе алгоритма синтеза апертуры существуют некоторые препятствующие факторы, такие как неоднородность и изменчивость среды распространения акустических волн, а также возникновение траекторных нестабильностей и неоднозначность измерения дальности вследствие многолучевости (в случае мелководных акваторий), которые возможно компенсировать при помощи оптимальных методов обработки траекторных сигналов, описанных в [10, 11].

Как было отмечено, разрешающая способность является одним из главных рабочих параметров гидроакустических систем. В [13] показано, что улучшение разрешающей способности профилографа по глубине может быть достигнуто применением широкополосных импульсных сигналов большой длительности с соответствующими корреляционными методами обработки, а обеспечение высокого разрешения по горизонтальной дальности может быть реализовано путем использования антенного устройства с СА.

Таким образом, задачей работы являлось исследование метода синтеза антенной апертуры применительно к устройству профилирования. Необходимо отразить алгоритм синтеза апертуры, а также привести оптимальные методы обработки траекторного сигнала.

Актуальность работы обусловлена широким применением профилографа как гидроаку-

стического устройства, позволяющего осуществлять производительное исследование строения донного грунта в целях классификации осадочных слоев, а также обеспечивать высокоэффективный поиск погруженных в грунт объектов, поскольку в последнее время наблюдается существенное увеличение количества обзорно-поисковых и обследовательских задач, требующих соответствующих решений с высокой степенью точности.

Основы алгоритма синтезирования апертуры профилографа. Принцип работы профилографа с СА заключается в облучении несколькими зондирующими импульсами одного и того же участка морского дна при перемещении устройства с последующим приемом отраженных от цели сигналов и их совместной обработкой. При различных положениях антенны устройства отраженные от одного и того же участка сигналы проходят разные расстояния, вследствие чего происходит изменение фазовых сдвигов этих сигналов. При этом синтезируется апертура длиной l и шириной характеристики направленности (ДН – диаграмма направленности) D_c :

$$D_c = \lambda/l,$$

где λ – длина волны, соответствующая центральной несущей частоте передатчика f_0 .

При производстве работ по выполнению профилографической съемки носитель устройства профилирования движется по прямолинейной траектории с равномерной скоростью, вследствие чего допускается рассмотрение искусственной антенной системы в виде линейной решетки, состоящей из N элементов. Алгоритм синтезирования апертуры для рассматриваемого случая, приведенный в [14, 15], заключается в перемещении антенны устройства профилирования в точке A по некоторой траектории, задаваемой вектором $\mathbf{r}(s)$, где s – параметр траектории (рис. 1) [15].

На рис. 1 показана геометрия съемки профилографом в режиме синтезирования, где x, y, z – оси системы координат; $L_0 = |\mathbf{R} - \mathbf{r}|$ – расстояние от точки фазового центра приемной антенны A до точки отражения T , которая определяется вектором \mathbf{R} .

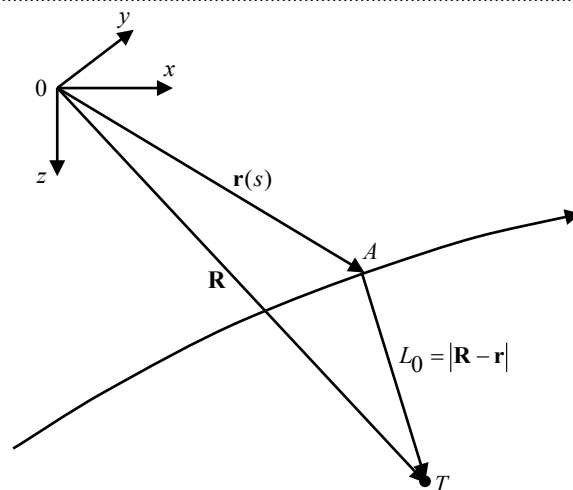


Рис. 1. Геометрия съемки профилографом в режиме синтезирования

Fig. 1. Survey geometry with a profiler in the synthesis mode

Антенна устройства принимает сигнал $Z(t, s)$, который описывается следующим выражением:

$$Z(t, s) = Z(t, \mathbf{r}(s)) = \int D(\mathbf{R} - \mathbf{r}) S\left(t - \frac{2|\mathbf{R} - \mathbf{r}|}{c}\right) d\mathbf{R},$$

где t – время прихода отраженного отклика сигнала; $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$ – вектор, задающий траекторию перемещения антенны; $D(\mathbf{R} - \mathbf{r})$ – характеристика направленности; $S\left(t - \frac{2|\mathbf{R} - \mathbf{r}|}{c}\right)$ – излучаемый сигнал; c – скорость распространения сигнала; $d\mathbf{R} = dx dy dz$ – отражающий элементарный объем.

Далее необходимо выполнить оценку коэффициента отражения $f(\mathbf{R})$ по совокупности измерений сигнала $Z(t, s)$ в разных точках траектории перемещения $\mathbf{r}(s)$. Оптимальная оценка $\tilde{f}(\mathbf{R})$ коэффициента отражения по соображениям среднеквадратической метрики описывается как

$$\tilde{f}(\mathbf{R}) = \int Z(t, s) D^*(\mathbf{R} - \mathbf{r}) S^*\left(t - \frac{2|\mathbf{R} - \mathbf{r}|}{c}\right) dt ds, \quad (1)$$

где D^* и S^* – функции, комплексносопряженные с D и S .

Данное соотношение, представляющее собой метод пространственно-временной корреляции, описывает алгоритм оптимальной обработки и устанавливает характеристики пространственного разрешения.

Необходимо выполнить оценку потенциальной разрешающей способности синтезирующей системы δl . В [9] указано, что вследствие движения реальной апертуры за период синтеза происходит расширение диаметра СА. Если учесть, что R_0 – дальность синтезирующей системы и D – ширина характеристики направленности антенны, то максимальный размер СА по формуле (1) определится [16]:

$$D_c = \lambda R_0 / D.$$

Вследствие того, что в процессе синтеза осуществляется излучение и прием реальной апертурой в каждом положении, при обработке происходит удвоение относительно фазового сдвига сигналов по сравнению с реальной антенной того же диаметра. Тогда можно записать:

$$\delta l = \lambda R_0 / (2D_c) = D/2.$$

Таким образом, формирование эхолокационного изображения от СА имеет такой же результат, как от реальной апертуры размером, увеличенным в 2 раза [9].

Основы обработки траекторного сигнала.

В первую очередь необходимо отметить, что непосредственно на траекторный сигнал профилографа оказывают влияние три основных обстоятельства, обособляющие процесс обработки сигнала. К ним относятся неоднородность и непостоянство среды распространения, скорость распространения сигнала, а также скорость движения носителя устройства. Вследствие неоднородности морской среды значение скорости звука не является постоянным, что, в свою очередь, препятствует обеспечению приемлемой фазовой стабильности сигнала, а также значительные изменения скорости звука имеют последствием раздвоение сигнала по причине преотражения его от неоднородных слоев морской воды или поверхности дна. Помимо этого, непостоянство значений скорости звука может помешать распространению сигнала по ровной прямолинейной траектории [9].

Кроме того, скорость распространения сигнала представляет ограничение дальности действия устройства и частоты получения отсчетов траекторного сигнала, что, в свою очередь,

может препятствовать безошибочному отображению фазы сигнала. Для обеспечения приемлемого значения этой частоты необходимо учитывать влияние еще одного фактора – скорости движения носителя устройства. К данному параметру предъявляются достаточно противоречивые требования. Так, при малых значениях скорости может быть частично решена проблема недостаточной частоты получения отсчетов траекторного сигнала, с другой стороны, при малых значениях скорости трудно обеспечить точную траекторию движения устройства. Как показано в [11], скорость носителя не должна превышать величины $v_{\max} = (cl) / (4R_{\max})$, где c – скорость звука в морской среде; l – суммарная длина ячеек приемной антенны; R_{\max} – дальность действия. Такое значение скорости движения носителя позволит обеспечить высокопроизводительное обследование поверхности и в то же время выдерживать точную траекторию движения.

Как было отмечено, работе алгоритма синтеза препятствуют некоторые факторы. Так, траектория движения носителя профилографа отличается от прямолинейной (опорной), т. е. траектория движения известна с недостаточной точностью, вследствие чего возникает вопрос траекторных нестабильностей – отклонений от опорной траектории, вызываемых случайными возмущениями при движении носителя устройства. Данный фактор накладывает существенные ограничения на работу алгоритма синтеза, поскольку для обеспечения высокой разрешающей способности необходимо располагать точными данными об изменении траектории движения приемной антенны устройства (с точностью до долей длины волны эхосигнала).

В [9–12] показано, что для оценки траекторных нестабильностей, а также компенсации флуктуаций среды распространения сигнала существует определенный механизм обработки траекторного сигнала, содержащий три основных этапа:

- сжатия с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и построения комплексной огибающей отраженного сигнала;
- микронавигации;
- автофокусировки.

Первый этап, являющийся предварительным, заключается в применении операции ЛЧМ-сжатия излучаемого сигнала, построения комплексной огибающей отраженного сигнала с использованием преобразования Гильберта и демодуляции. Так, в результате описанной последовательности выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$\tilde{f}(\mathbf{R}) = \int \dot{Z}(t,s) \exp\left[-j\frac{2\pi c}{\lambda}\left(t - \frac{2|\mathbf{R}-\mathbf{r}|}{c}\right)\right] dt ds; \quad (2)$$

где $\dot{Z}(t,s) = \left(Z(t,s)_t^* S(t)\right) \exp(-j\omega_0 t)$ – комплексная огибающая траекторного сигнала; j – мнимая единица; обозначение $_t^*$ – операция свертки по переменной t ; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая круговая частота.

При движении носителя в реальных условиях во время синтезирования возникает фазовая ошибка $\delta\varphi$, обусловленная траекторными неустойчивостями, вследствие которой происходит смещение фазы огибающей траекторного сигнала:

$$\delta\varphi = \frac{2\delta r \omega}{c},$$

где $\delta r = L - L_0$ – траекторная ошибка; L – расстояние от реального положения фазового центра антенны до точки отражения.

Этапы микронавигации и автофокусировки (второй и третий этапы соответственно) обеспечивают оценку траекторных неустойчивостей и флуктуаций среды распространения сигнала. Различие данных этапов обработки заключается в величине оцениваемых отклонений: на этапе микронавигации оцениваются отклонения величиной нескольких единиц или десятков длин волн λ , а при автофокусировке компенсируются возмущения в пределах одной длины волны λ .

Микронавигация осуществляет уточнение траектории движения ФЦА ("выпрямление" траекторного сигнала при его поступлении) с помощью метода "избыточного фазового центра" [17], что является недостаточной оценкой – данный этап является промежуточным для обеспечения алгоритма автофокусировки.

Автофокусировка является заключительной стадией обработки, в процессе которой осу-

ществляется дополнительное уточнение траекторной ошибки δr и синтез (2) с коррекцией $\delta\varphi$, что в конечном итоге обеспечивает заданную разрешающую способность эхолокационного изображения в условиях реального движения носителя, приближенную к теоретической $\delta l = D/2$. Существует множество применяемых на практике алгоритмов автофокусировки, которые подробно описаны в [9, 17, 18].

Для отражения эффективности использования метода синтезирования антенной апертуры далее приведены примеры профилограмм (рис. 2, 3), полученных при работе устройства, разработанного в ИМПТ ДВО РАН, – буксируемого акустического ЛЧМ-профилографа высокого разрешения [13].

На рис. 2 представлена профилограмма дна в поперечном разрезе Амурского залива на траверзе мыса Россета, где отчетливо виден слоистый чехол осадочных пород, мощность которого увеличивается с 10...12 м на акватории, прилегающей к городу, до 30...35 м на противоположной части залива. На рис. 3 представлен результат обработки исходного изображения при использовании алгоритма синтезирования, который

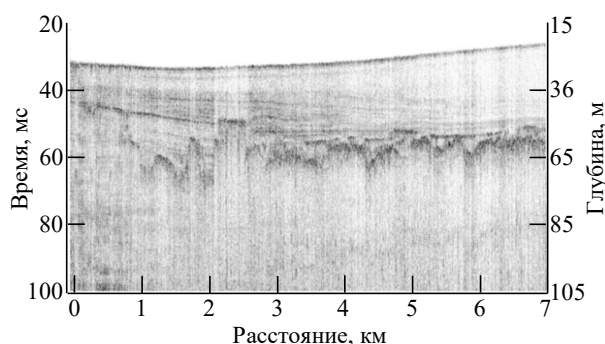


Рис. 2. Исходное изображение

Fig. 2. Original image

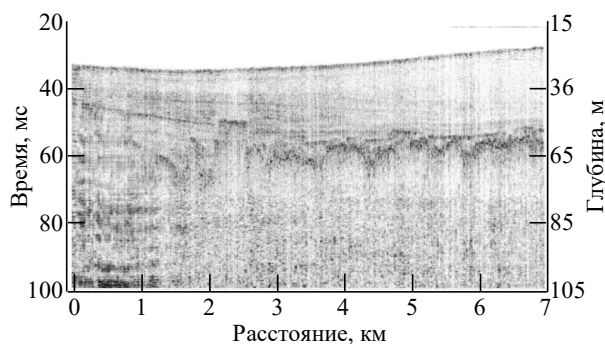


Рис. 3. Обработанное изображение, размер апертуры синтезирования 15 м

Fig. 3. Processed image, synthetic aperture length of 15 m

свидетельствует о том, что после соответствующей обработки на изображении становятся более контрастными донные структуры с хорошим отражением, а также видно увеличение глубины прозвучивания, обусловленное сужением ДН СА.

Заключение. Таким образом, получение эхолокационных изображений высокого разрешения при применении устройства профилирования с достаточным проникновением зондирующего сигнала в морской грунт и сохранением требуемой пространственной разрешающей способности обеспечивается при использовании метода синтеза антенной апертуры – система оптимально выработанных алгоритмов обработки траекторного сигнала при реальных условиях

движения носителя устройства профилирования определяет необходимую разрешающую способность эхолокационного изображения.

В настоящее время имеется опыт применения профилографа с использованием данных алгоритмов, что отражает эффективность использования таких средств для задач выделения малоразмерных структур и объектов. Также необходимо отметить, что имеющийся опыт в предыдущих разработках, таких как ГБО СА, является представительной основой для перспективных направлений различных исследований и выполнения работ по реализации синтеза апертуры антенны применительно к устройству профилирования и дальнейших усовершенствований таких устройств.

Список литературы

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 409 с.
2. Нестеров Н. А. Некоторые аспекты технологии гидролокационного поиска донных объектов // Навигация и гидрография. 2014. № 38. С. 57–65.
3. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. 244 с.
4. Костоусов А. В., Костоусов В. Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Материалы 4-го Междунар. симп. "Обобщенные решения в задачах управления". Улан-Удэ: Изд-во Бурятского ун-та, 2008. С. 74–76.
5. Касаткин Б. А., Злобина Н. В. Эффект самофокусировки ненаправленного акустического излучения в слоистых средах // Докл. Академии наук. 2010. Т. 432, № 5. С. 681–684.
6. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны: справ. по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1984. 300 с.
7. Воронин А. В., Воронин В. А. Гидроакустическая гибкая протяженная приемная антенна для параметрического профилографа донных осадков // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2013. № 9 (146). С. 140–144.
8. Золотарев В. В. Гидролокаторы с синтезированной апертурой для автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1 (3). С. 21–26.
9. Костоусов А. В., Костоусов В. Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 2 (6). С. 16–29.
10. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей / А. Л. Агеев, Г. А. Игумнов, В. Б. Костоусов, И. Б. Агафонов, В. В. Золотарев, Е. А. Мадисон // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2013. № 3(140). С. 140–148.
11. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей / А. Л. Агеев, Г. А. Игумнов, В. Б. Костоусов, И. Б. Агафонов, В. В. Золотарев, Е. А. Мадисон // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2(14). С. 13–27.
12. Применение методов микронавигации и автофокусировки для синтезирования апертуры многоканального ГБО / А. Л. Агеев, Г. А. Игумнов, В. Б. Костоусов, И. Б. Агафонов, В. В. Золотарев, Е. А. Мадисон // Техн. пробл. освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 496–500.
13. Касаткин Б. А., Косарев Г. В. Опыт работы акустического профилографа с использованием алгоритмов синтезирования и фокусировки // Техн. пробл. освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 183–189.
14. Применение методов синтезирования апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах / А. И. Захаров, В. И. Каевицер, В. М. Разманов, В. Н. Раскатов // Тр. IX Всерос. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". СПб.: Наука, 2008. С. 143–147.
15. Косарев Б. А., Косарев Г. В. Цифровая обработка сигналов акустическим профилографом методами синтезирования апертуры // Техн. пробл. освоения Мирового океана. 2009. Т. 3. С. 317–319.
16. Смаришев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 280 с.
17. Нестеров Н. А. Некоторые аспекты технологии гидролокационного поиска донных объектов // Навигация и гидрография. 2014. № 38. С. 57–65.
18. Моряков С. И., Нестеров С. М., Скородумов И. А. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений радиоэлектроники // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 8. С. 1–15. doi: 10.30898/1684-1719.2018.8.11

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – гидроакустика; неразрушающий контроль.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: av.vagin@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Воротынцева Алена Сергеевна – студентка 4-го курса кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – гидроакустика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

References

1. Koryakin Yu. A., Smirnov S. A., Yakovlev G. V. *Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika. Sostoyanie i aktual'nye problemy* [Shipborne Sonar Technology. Status and Current Issues]. SPb., Nauka, 2004, 409 p. (In Russ.)
2. Nesterov N. A. Some Aspects of Sonar Search Technology for Bottom Objects. Navigation and Hydrography. 2014, no. 38, pp. 57–65. (In Russ.)
3. Bogorodskii A. V., Ostrovskii D. B. *Gidroakusticheskie navigatsionnye i poiskovo-obsledovatel'skie sredstva* [Hydroacoustic Navigation and Search and Survey Aids]. SPb., ETU Publishing house, 2009, 244 p. (In Russ.)
4. Kostousov A. V., Kostousov V. B. Simulation of a Side-Scan Sonar with a Synthetic Aperture. Proc. of the 4th Intern. Symp. "Generalized Solutions in Control Problems". Ulan-Ude, Publ. House of the Buryat University, 2008, pp. 74–76. (In Russ.)
5. Kasatkin B. A., Zlobina N. V. The Effect of Self-Focusing of Omnidirectional Acoustic Radiation in Layered Media. *Doklady Akademii nauk*. 2010, vol. 432, no. 5, pp. 681–684. (In Russ.)
6. Smaryshev M. D., Dobrovolsky Yu. Yu. Hydroacoustic Antennas. Handbook for Calculating the Directional Properties of Hydroacoustic Antennas. Leningrad, Shipbuilding, 1984, 300 p. (In Russ.)
7. Voronin A. V., Voronin V. A. The Hydroacoustic Flexible Extended Reception Array for Parametrical Profiler Subbottom Deposits. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013, no. 9(146), pp. 140–144. (In Russ.)
8. Zolotarev V. V. Synthetic Aperture Sonars for an Autonomous Underwater Robot. Underwater Investigations and Robotics. 2007, no. 1(3), pp. 21–26. (In Russ.)
9. Kostousov A. V. Simulation of a Side-Scan Sonar with a Synthetic Aperture. Underwater Investigations and Robotics. 2008, no. 2(6), pp. 16–29. (In Russ.)
10. Ageev A. L., Igumnov G. A., Kostousov V. B., Agafonov I. B., Zolotarev V. V., Madison E. A. Aperture Synthesizing for Multichannel Side-Scan Sonar with Compensation of Trajectory Instability. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013, no. 3 (140), pp. 140–148. (In Russ.)
11. Ageev A. L., Igumnov G. A., Kostousov V. B., Agafonov I. B., Zolotarev V. V., Madison E. A. Aperture Synthesizing for Multichannel Side-Scan Sonar with Compensation of Trajectory Instability. Underwater Investigations and Robotics. 2012, no. 2(14), pp. 13–27. (In Russ.)
12. Ageev A. L., Igumnov G. A., Kostousov V. B., Agafonov I. B., Zolotarev V. V., Madison E. A. Application of Micronavigation and Autofocusing Methods for Synthesizing the Aperture of a Multichannel HBO. Technical Problems of the Development of the World Ocean. 2013, vol. 5, pp. 496–500. (In Russ.)
13. Kasatkin B. A., Kosarev G. V. Experience of Acoustic Profiler Operation Using Synthesis and Focusing Algorithms. Technical Problems of the Development of the World Ocean. 2013, vol. 5, pp. 183–189. (In Russ.)
14. Zakharov A. I., Kaevitser V. I., Razmanov V. M., Raskatov V. N. Application of Aperture Synthesis Methods in Low-Frequency Echo Sounders-Profilographs. Proc. of the IX All-Russ. Conf. "Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics". SPb., Nauka, 2008, pp. 143–147. (In Russ.)
15. Kosarev B. A., Kosarev G. V. Digital Signal Processing by an Acoustic Profiler Using Aperture Synthesis Methods. Technical Problems of the Development of the World Ocean. 2009, vol. 3, pp. 317–319. (In Russ.)
16. Smaryshev M. D. *Napravlennost' gidroakusticheskikh antenn* [Directionality of Hydroacoustic Antennas]. Leningrad, Shipbuilding, 1973. 280 p. (In Russ.)
17. Nesterov N. A. Some Aspects of the Technology of Sonar Search for Bottom Objects. Navigation and Hydrography. 2014, no. 38, pp. 57–65. (In Russ.)
18. Moryakov S. I., Nesterov S. M., Skorodumov I. A. Algorithms of Autofocusing Two Dimensional ISAR Images. *J. of Radio Electronics*. 2018, no. 8, pp. 1–15. doi: 10.30898/1684-1719.2018.8.11

Information about the authors

Anton V. Vagin, Master in Instrument Engineering (2020), Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: hydroacoustics; nondestructive testing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: av.vagin@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Alena S. Vorotyntseva, student of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: hydroacoustics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: avorotyntseva@yandex.ru
