DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-191-198
УДК 629.58:629.5.07

А.В. Иванов, А.В. Новиков
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОРСКИХ РАЙОНОВ

Объект и цель научной работы. Объектом являются способы и средства навигационного оборудования морских районов. Цель исследования – разработка способов и средств, позволяющих в заданные сроки оперативно оборудовать удаленный морской район дистанционно управляемой мобильной навигационной гидроакустической системой с донными гидроакустическими маяками, с последующим ее демонтажем и оборудованием следующего близлежащего района.

Материалы и методы. Проведен глубокий анализ имеющихся материалов о современном состоянии объекта и присущих ему недостатках. Для их устранения и достижения новых качеств у объекта исследования – мобильности, оперативности и многократности применения средств навигационного оборудования морских районов – использовались известные теоретические методы исследования: анализ, синтез, аналогия и моделирование.

Основные результаты. Описано техническое устройство мобильного гидроакустического буя-маяка, составляющего основу новой дистанционно управляемой мобильной навигационной гидроакустической системы, а также способы навигационного оборудования морских районов.

Заключение. Теоретически обоснована целесообразность использования дистанционно управляемой мобильной навигационной гидроакустической системы и способов навигационного оборудования морских районов с применением мобильных донных гидроакустических маяков. Рассмотренная дистанционно управляемая мобильная навигационная гидроакустическая система является универсальной, мобильной и многоразовой; она способна в установленные сроки, в любых условиях гидрометеорологической и ледовой обстановки обеспечивать требуемые навигационные параметры надводных и подводных объектов, действующие в заданных морских районах.

Ключевые слова: навигационные гидроакустические системы, маневренные гидроакустические системы подводной навигации, мобильные гидроакустические буи-маяки.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-191-198
UDC 629.58:629.5.07

A. Ivanov, A. Novikov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

NAVIGATION SUPPORT APPLICATIONS OF UNDERWATER VEHICLES

Object and purpose of research. This paper discusses navigation support methods and tools for distant water areas to work out fast deployment techniques for navigation support system (remotely controlled mobile sonar suite with seabed beacons).

Materials and methods. This paper is an in-depth analysis of available materials on the current condition of this system, intended to enhance its capabilities and correct existing drawbacks, so as to make this system truly mobile and fast-to-redeploy. This task was accomplished by means of common theoretical methods (analysis, synthesis, analogy and simulation).

Для цитирования: Иванов А.В., Новиков А.В. Применение подводных аппаратов для навигационного оборудования морских районов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 1(391): 191–198.

For citations: Ivanov A., Novikov A. Navigation support applications of underwater vehicles. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 1(391): 191–198 (in Russian).

Main results. This paper describes a mobile sonar beacon, the key element of suggested remotely controlled mobile navigation sonar suite, as well as navigation support methods for water areas.
Conclusion. This study gives a theoretical justification to the practicability of remotely controlled mobile navigation sonar suite and navigation support methods for water areas based on mobile sonar beacons installed on seabed. This flexible, mobile and fast-to-deploy system will certainly become a valuable asset providing navigation support to ships and submarines in whatever metocean and ice conditions.
Keywords: sonar navigation suites, mobile sonar systems for underwater navigation, mobile sonar beacons.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Под навигационным оборудованием морских районов подразумевается комплекс мероприятий, проводимых с целью развертывания, ввода и поддержания в действующем состоянии различных средств навигационного оборудования (СНО) [1].

Применение СНО обеспечивает решение трех основных задач:

- плавание кораблей и судов в открытом море и вблизи берегов;
- плавание кораблей и судов в стесненных районах: по фарватерам, каналам и в узкостях;
- ограждение каналов, фарватеров и предупреждение навигационных опасностей.

С целью повышения эффективности и надежности работы СНО морских районов осуществляют их комплексирование.

В последние годы требования к навигационному обеспечению судовождения в обширных районах Мирового океана постоянно возрастают. Это связано с расширением добычи и транспортировки природных ресурсов в морях и океанах, освоением арктических шельфов и повышением активности военно-морских сил и флотов ведущих морских держав в этих районах. В иностранных флотах создаются и широко внедряются навигационные гидроакустические системы (НГС) с донными гидроакустическими маяками (ДГМ), которые обеспечивают необходимые навигационные параметры надводным кораблям, подводным лодкам и глубоководным подводным аппаратам, в том числе подо льдом [2–5]. ДГМ таких систем могут устанавливаться на глубинах до 6000 м практически в любых районах Мирового океана. Дальность действия НГС с донными маяками достигает 20–25 км [6].

Навигационные гидроакустические системы с донными гидроакустическими маяками (НГС с ДГМ) подразделяются на:

- дальномерно-пеленгационные;
- дальномерные;
- разностно-дальномерные;
- пеленгационные.

Дальномерно-пеленгационные системы сообщают объекту навигации расстояние до гидроакустического маяка и указывают направление к нему. Место объекта в таких системах определяется как точка пересечения поверхности сферы с маяком в центре и радиусом, равным наклонному расстоянию до маяка, с горизонтальной плоскостью, в которой находится объект, и вертикальной плоскостью, соответствующей пеленгу на маяк. Они получили наибольшее распространение, т.к. позволяют однозначно определять координаты объекта по одному гидроакустическому маяку.

С помощью дальномерных систем на объектах навигации определяются наклонные или горизонтальные расстояния до установленных на грунте двух или более гидроакустических маяков. Место объекта определяется как точка пересечения двух или более сфер с центрами в точках установки маяков и с радиусами, равными наклонным расстояниям от маяков до объекта с горизонтальной плоскостью, в которой он находится, либо как точка пересечения двух и более окружностей, проведенных из точек установки маяков, с радиусами, равными горизонтальным расстояниям от маяков до объекта.

Разностно-дальномерные системы позволяют определять разности расстояний от трех или более гидроакустических маяков до объекта навигации. В этом случае источниками сигналов могут быть как объект навигации, так и синхронизированные донные маяки с известными координатами их места постановки. Местоположение объекта находится как точка пересечения гиперболоидов вращения, в фокусах которых расположены гидроакустические маяки.

С помощью пеленгационных систем объект получает от двух маяков направления их местонахождения, а место объекта определяется как точка пересечения двух вертикальных плоскостей, соответствующих пеленгам на маяки, с горизонтальной плоскостью, в которой находится объект. Донные маяки излучают сигналы по заданной программе, которые пеленгуются на объектах навигации штатными гидроакустическими пеленгаторами.

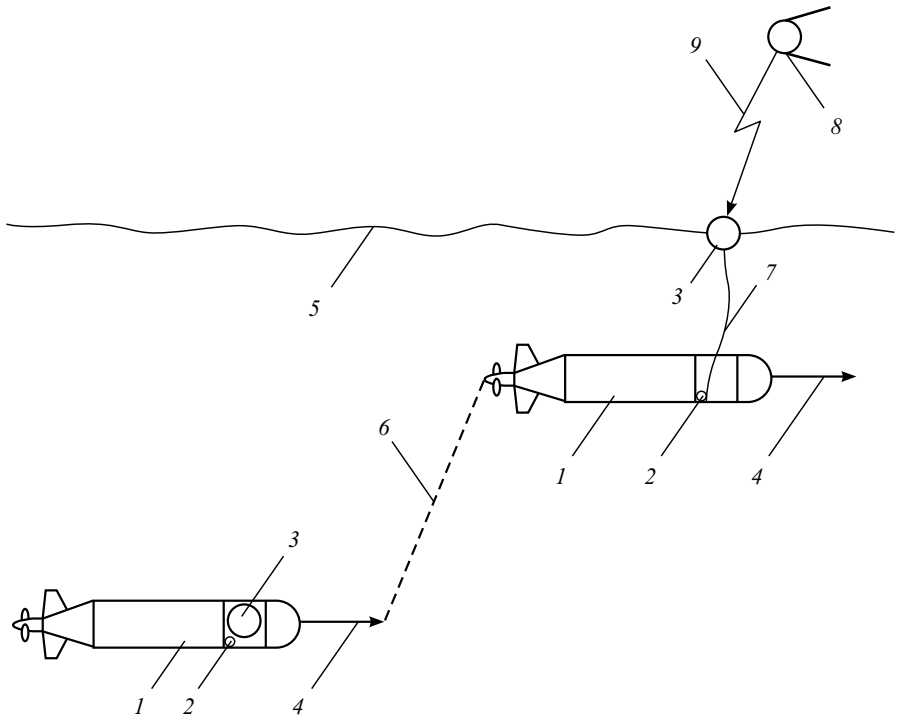

Рис. 1. Переход мобильного гидроакустического буя-маяка в заданную точку: *1* – мобильный гидроакустический буй-маяк; *2* – катушка с кабелем устройства отделения и возвращения поплавка; *3* – поплавок; *4* – вектор скорости мобильного гидроакустического буя-маяка; *5* – поверхность моря; *6* – траектория всплытия мобильного гидроакустического буя-маяка; *7* – кабель, связывающий электронную аппаратуру поплавка с системой управления мобильного гидроакустического буя-маяка; *8* – космический аппарат спутниковой системы навигации; *9* – информация, передаваемая с космического аппарата на мобильный гидроакустический буй-маяк

Fig. 1. Transit of mobile sonar beacon to the required location:
1 – beacon; *2* – cable reel for floater release/recovery; *3* – floater; *4* – beacon speed vector; *5* – sea surface; *6* – beacon surfacing trajectory; *7* – connection cable between the electronics inside the floater and control system of the beacon; *8* – navigation satellite; *9* – data transmitted from the satellite to the beacon

Недостатками существующих НГС, сдерживающими применение ДГМ, являются ограниченное время их эксплуатации, обусловленное возможностями используемых источников тока, одноразовость, сложность процесса оборудования ими удаленных и глубоководных районов, а также районов, покрытых льдом.

С целью придания мобильности НГС в концерне «Океанприбор» в 2016 г. была предложена подводная система навигации и связи «Позиционер», состоящая из автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и гидроакустических буев с аппаратурой спутниковой связи «Гонец-Д1М» и навигации ГЛОНАСС. Данная система способна обеспечивать навигационными данными работу подводных объектов на глубинах до 8000 м [7]. Она предусматривает создание в заданном районе позиции из нескольких донных маяков-ответчиков, устанавливаемых в заданных точках, обеспечивающих подводные объекты необходимыми навигационными параметрами. Недостатком данной системы является ее одноразовость: после окончания использования донные маяки-ответчики остаются на дне и возвращению не подлежат. Устранить указанный недостаток можно с помощью предлагаемой ниже системы навигационного оборудования морского района, использующей несколько мобильных гидроакустических буев-маяков. Работа одного из них показана на рис. 1.

Многоразовость использования предлагаемой системы обеспечивается тем, что доставку буев-маяков в назначенные точки, их установку и последующую эвакуацию осуществляет группа АНПА, в отсеках полезной нагрузки которых размещаются гидроакустические маяки-ответчики дальномерного типа, устройство их отделения и возвращения на место после использования. АНПА выпускаются с плавсредства или летательного аппарата, после чего передвигаются по заданному маршруту на заданной глубине в заданную для каждого из них точку. В процессе своего развертывания они используют звукоподводную связь (ЗПС), средства подводного наблюдения и действуют в группе согласованно. На участке перехода и в заданной точке они уточняют свое местоположение, для чего отделяют от АНПА поплавок

с антенной и приемником спутниковой системы навигации типа ГЛОНАСС, аппаратурой приема и излучения гидроакустических сигналов, разматывают соединяющий кабель и поднимают поплавок с антенной на поверхность воды, где получают от спутниковой системы навигации координаты всплывшего поплавка (рис. 1).

После уточнения места в вычислительном устройстве по известной глубине и смещению поплавка от подводного аппарата рассчитывают его географические координаты, осуществляют покладку АНПА на грунт и приводят гидроакустический буй-маяк в рабочее положение, для чего с помощью устройства отделения и возвращения поплавка устанавливают заданную длину кабеля между поплавком с антенной и буем (рис. 2). С учетом показаний датчиков гидростатического и гидродинамического давления, длины кабеля поплавка с антенной и глубины погружения АНПА в вычислительном устройстве рассчитывают истинные географические координаты поплавка с антенной мобильного гидроакустического буя-маяка и переводят его в дежурный режим работы.

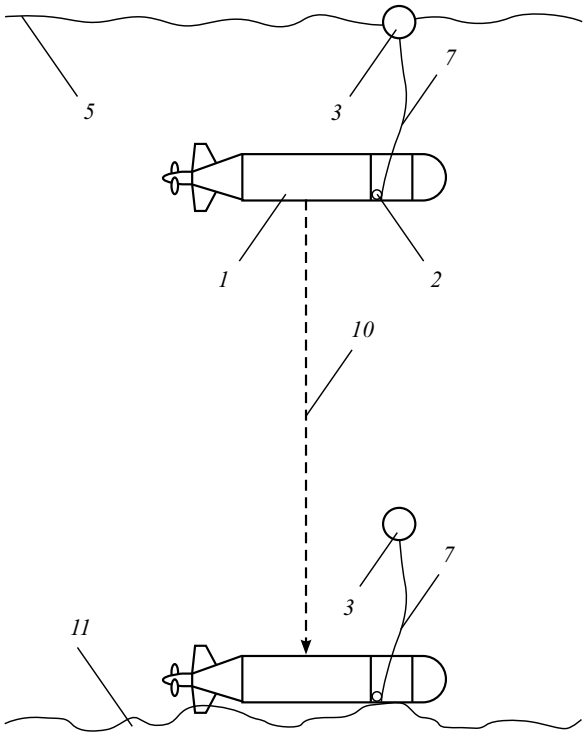

Рис. 2. Приведение мобильного гидроакустического буя-маяка в рабочее положение:
1 – мобильный гидроакустический буй-маяк;
2 – катушка с кабелем устройства отделения и возвращения поплавка; *3* – поплавок;
5 – поверхность моря; *7* – кабель, связывающий электронную аппаратуру поплавка с системой управления мобильного гидроакустического буя-маяка; *10* – траектория погружения мобильного гидроакустического буя-маяка;
11 – морское дно

Fig. 2. Bringing the beacon to operational position:
1 – beacon; *2* – cable reel for floater release/recovery;
3 – floater; *5* – sea surface; *7* – connection cable between the electronics inside the floater and control system of the beacon; *10* – beacon dive trajectory;
11 – seabed

С получением запроса от объекта навигации буй-маяк передает ему координаты и дистанцию до объекта, рассчитываемую в вычислительном устройстве по отрезку времени между запросом и ответом с учетом известной скорости распространения звука в воде. По команде с пункта управления, транслируемой по ЗПС прибывшим плавсредством или другим ретранслятором, сбрасываемым в районе, АНПА выбирает кабель с поплавком и антенной на борт и меняет позицию, переходя в другой район (рис. 3).

Такая система навигационного оборудования с использованием мобильных гидроакустических буев-маяков может применяться не только на открытой воде, но и в районах, отягощенных льдом. В этом случае переход группы АНПА осуществляется поэтапно: каждый аппарат при движении корректирует свою позицию по дистанциям от двух соседних аппаратов, располагающихся по разным бортам. С прибытием в очередную точку АНПА осуществляет покладку на грунт, отделяет антенну и переходит в дежурный режим для обеспечения ориентирования следующего аппарата группы. Так происходит до прихода группы в заданный район (рис. 4).

Необходимые для вычислительного устройства АНПА данные (рис. 5, 6), используемые для расчетов на позиции, записываются в запоминающее устройство. Расчеты навигационных параметров производятся с применением известной методики [6].

Так, при дальномерном пеленговании место объекта навигации и его ориентация относительно донного маяка определяются по формулам (рис. 7):

$$r = c\frac{\Delta t}{2}; \qquad D_r = \sqrt{r^2 - h^2}, \tag{1}$$

где r – наклонная дальность от объекта до донного маяка, м; Δt – интервал времени между моментом излучения сигнала-запроса донного маяка и мо-

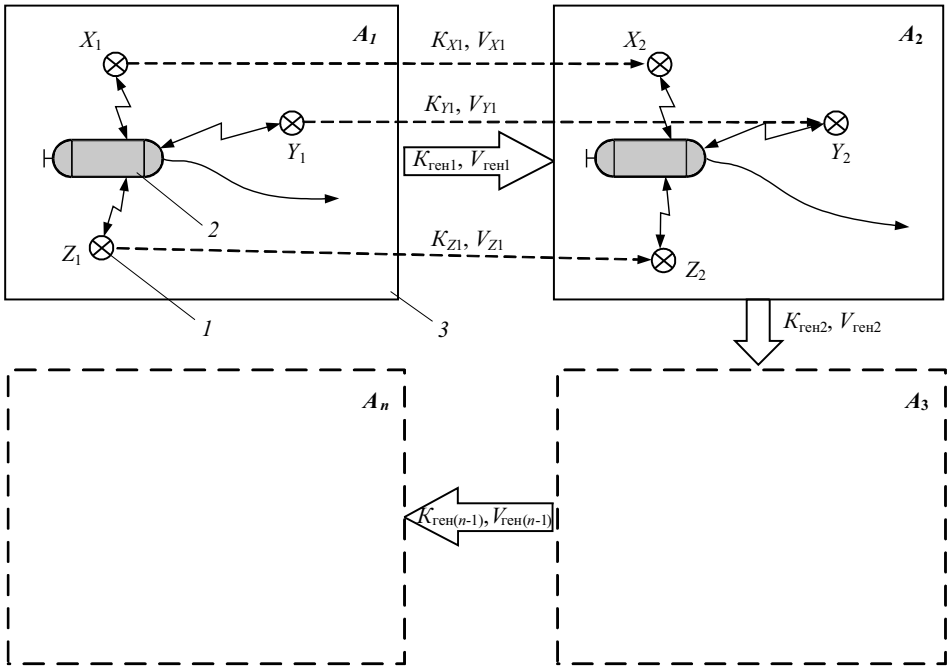

Рис. 3. Система навигационного оборудования морских районов с использованием мобильных гидроакустических буев-маяков: *1* – X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2 – мобильные гидроакустические буи-маяки; *2* – подводный объект; *3* – A_1, A_2, A_3, A_n – морские районы

Fig. 3. Navigation support system based on mobile sonar beacons: *1* – X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2 – beacons; *2* – underwater object; *3* – A_1, A_2, A_3, A_n – operation areas

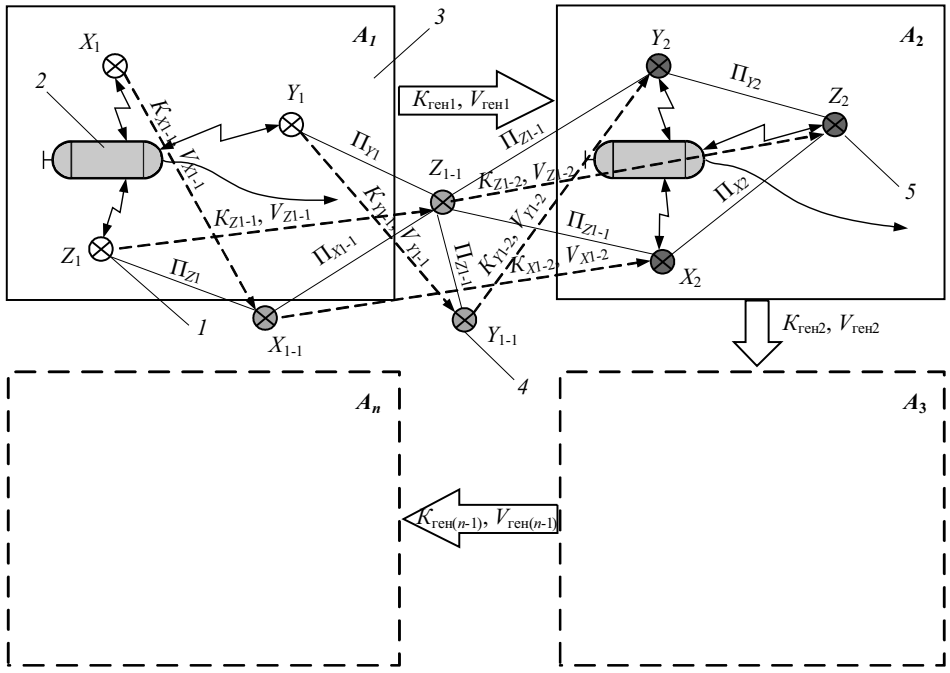

Рис. 4. Система навигационного оборудования морских районов с использованием мобильных гидроакустических буев-маяков подо льдом: *1* – начальные позиции мобильных гидроакустических буев-маяков X_1, Y_1, Z_1; *2* – подводный объект; *3* – A_1, A_2, A_3, A_n – морские районы, *4* – промежуточные позиции мобильных гидроакустических буев-маяков X_{1-1}, Y_{1-1}, Z_{1-1}; *5* – назначенные новые позиции мобильных гидроакустических буев-маяков X_2, Y_2, Z_2

Fig. 4. Subglacial navigation support system based on mobile sonar beacons: *1* – initial positions of beacons X_1, Y_1, Z_1; *2* – underwater object; *3* – A_1, A_2, A_3, A_n – operation areas, *4* – intermediate positions of beacons X_{1-1}, Y_{1-1}, Z_{1-1}; *5* – designated new positions of beacons X_2, Y_2, Z_2

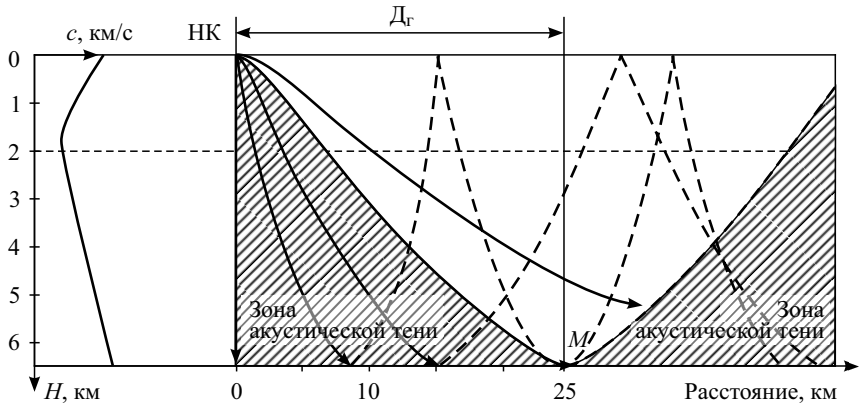

Рис. 5. Образование зоны акустической тени при связи объекта навигации с донным маяком: НК – надводный корабль; *М* – донный маяк; Дг – геометрическая дальность действия; *c* = *f*(*H*) – распределение скорости звука по глубине в районе установки донного маяка

Fig. 5. Acoustic shadow formation during the communication between a surface ship and seabed beacon: НК – ship; *M* – beacon; Дг – geometric range; *c* = *f*(*H*) – distribution of sound velocity by depth at the beacon location

ментом приема сигнала-ответа, с; *c* – средняя скорость звука на трассе распространения сигнала, м/с; D_r – горизонтальное расстояние от объекта до донного маяка; *h* – разность в заглублении донного маяка и акустической антенны объекта от поверхности моря. Погрешность в определении пеленга на донный маяк составляет около 2 %.

Для повышения точности пеленгования маяка применяется моноимпульсное пеленгование, реализуемое в дальномерно-пеленгационных системах, имеющих четыре гидрофона, расположенных на двух взаимно перпендикулярных линиях и на расстоянии *a* друг от друга в каждой линии (базе) (рис. 7). Координаты объекта рассчитываются с помощью следующих выражений [6]:

$$\Delta t_1 = \frac{a}{c_0}\cos\alpha; \quad \Delta t_2 = \frac{a}{c_0}\cos\beta;$$
$$\alpha = \arccos\frac{c_0\Delta t_1}{a}; \quad \beta = \arccos\frac{c_0\Delta t_2}{a}, \tag{2}$$

где Δt_1 и Δt_2 – разность времени прихода сигнала к гидрофонам первой базы под углом α к линии $Г_1$–$Г_2$ и гидрофонам второй базы под углом β к ли-

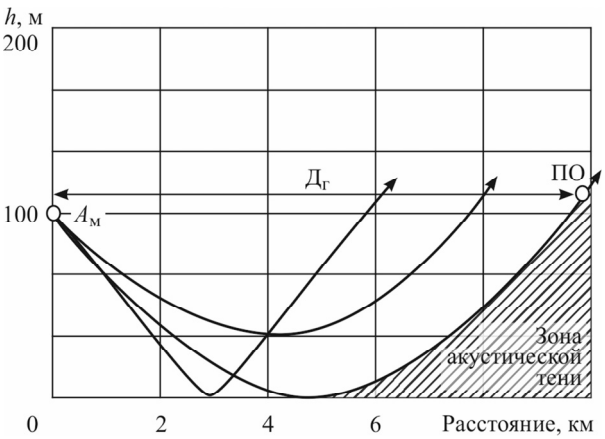

Рис. 6. Образование зоны акустической тени при связи подводного объекта в придонном слое с донным маяком: *h* – высота подъема антенны маяка над грунтом; $A_м$ – антенна донного маяка; ПО – подводный объект; Дг – геометрическая дальность действия

Fig. 6. Acoustic shadow formation during the communication between a submarine and seabed beacon: *h* – elevation height of beacon antenna (above the seabed); $A_м$ – antenna of seabed beacon; ПО – underwater object; Дг – geometric range

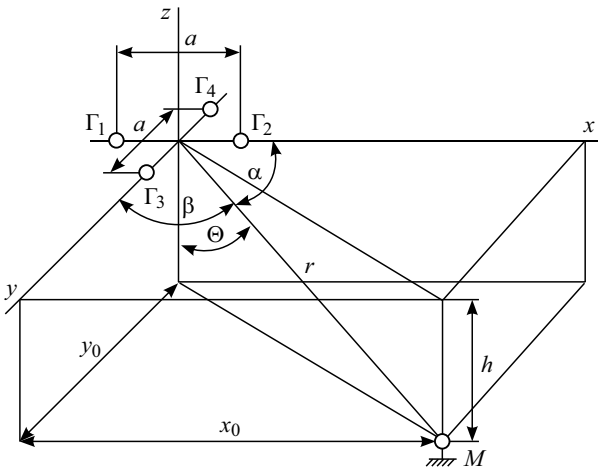

Рис. 7. Определение места корабля с помощью моноимпульсного пеленгования: *М* – донный маяк; $Г_1$–$Г_2$ – первая база корабельных приемных гидрофонов, ориентированная по оси *x*; $Г_3$–$Г_4$ – вторая база корабельных приемных гидрофонов, ориентированная по оси *y*

Fig. 7. Determination of ship location by means of monopulse direction finding: *M* – seabed beacon; $Г_1$–$Г_2$ – first base of receiving ship hydrophones positioned along *x* axis; $Г_3$–$Г_4$ – second base of receiving ship hydrophones positioned along *y* axis

нии $Г_3$–$Г_4$; c_0 – скорость звука в слое воды у корпуса объекта, м/с; a – длина базы (расстояние) между двумя парами гидрофонов, м.

Если измеряются разности не времени прихода сигналов к гидрофонам базы, а фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ сигнала частоты f_0 (Гц), то углы α и β рассчитываются по следующим формулам [6]:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi f_0 a}{c_0}\cos\alpha; \quad \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi f_0 a}{c_0}\cos\beta;$$
$$\alpha = \arccos\frac{c_0\Delta\varphi_1}{2\pi f_0 a}; \quad \beta = \arccos\frac{c_0\Delta\varphi_2}{2\pi f_0 a}. \tag{3}$$

Если две приемные базы из четырех гидрофонов располагаются в плоскости, параллельной плоскости палубы объекта навигации, имеют общий центр и ортогональны, линия одной базы x направлена вдоль диаметральной плоскости объекта, а линия второй базы y – по траверзу вправо (рис. 7), то координаты маяка в системе координат объекта навигации найдутся по формулам [6]:

$$x_0 = r\cos\alpha = \frac{h\cos\alpha}{\sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta}} = \frac{h\cos\alpha}{\cos\theta};$$
$$y_0 = r\cos\beta = \frac{h\cos\alpha}{\sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta}} = \frac{h\cos\beta}{\cos\theta}, \tag{4}$$

где r – наклонное расстояние от объекта навигации до маяка, м; h – разность в заглублении маяка и приемных гидрофонов от поверхности моря, м; θ – угол места маяка.

Предлагаемая система навигационного оборудования с использованием мобильных гидроакустических буев-маяков обеспечивает мобильность, оперативность и многоразовость применения навигационного оборудования в морских районах для выполнения задач надводными и подводными объектами навигации на открытой воде и в ледовых условиях.

Библиографический список

1. *Калинский И.С.* Навигационное оборудование морских театров. Ленинград: ВВМКУ им. М.В. Фрунзе, 1980. С. 253–256.
2. *Костенко В.В.*, *Львов О.Ю.* Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1(23). С. 31–43.
3. *Costanzi R.*, *Fenucci D.*, *Giagnoni S.*, *Munafò A.*, *Caiti A.* An Evaluation of Deep Water Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles // IFAC-PapersOnLine. 2017. 50(1). P. 13680–13685.
4. *Almeida R.*, *Cruz N.*, *Matos A.* Man portable acoustic navigation buoys // OCEANS 2016 – Shanghai. Shanghai, China, 10–13 April, 2016.
5. *Khan R.*, *Ercan M.F.*, *Metarsit L.*, *Tan W.T.*, *Ang J.L.* Underwater navigation using maneuverable beacons for localization // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, USA, 19–23 September 2016.
6. *Калинский И.С.* Навигационное оборудование морских театров. Ленинград: ВВМКУ им. М.В. Фрунзе, 1980. С. 292–300.
7. *Литовкин Д.*, *Рамм А.* В России создан подводный ГЛОНАСС [Электрон. ресурс] / Известия IZ: [сайт]. – URL: https//iz.ru/news/650211 (дата обращения: 12.12.2019).

References

1. *I. Kalinsky*. Navigation support for maritime theaters. Leningrad: M.V. Frunze Higher Naval School, 1980. P. 253–256 (*in Russian*).
2. *V. Kostenko, O. Lvov*. Combined systems of communication and navigation for autonomous underwater robot equipped with a float towed unit // Underwater Investigations and Robotics. 2017. No. 1(23). P. 31–43 (*in Russian*).
3. *R. Costanzi*, *D. Fenucci*, *S. Giagnoni*, *A. Munafò*, *A. Caiti.* An Evaluation of Deep Water Navigation Systems for Autonomous Underwater Vehicles // IFAC-PapersOnLine. 2017. 50(1). P. 13680–13685.
4. *R. Almeida*, *N. Cruz*, *A. Matos*. Man portable acoustic navigation buoys // OCEANS 2016 – Shanghai. Shanghai, China, 10–13 April, 2016.
5. *R. Khan*, *M.F. Ercan*, *L. Metarsit*, *W.T. Tan*, *J.L. Ang*. Underwater navigation using maneuverable beacons for localization // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, USA, 19–23 September 2016.
6. *I. Kalinsky*. Navigation support for maritime theaters. Leningrad: M.V. Frunze Higher Naval School, 1980. P. 292–300 (*in Russian*).
7. *D. Litovkin*, *A. Ramm*. Russia comes up with underwater GLONASS / Web site of *Izvestiya* newspaper. URL: https//iz.ru/news/650211 (accessed on 12.12.2019) (*in Russian*).

Сведения об авторах

Иванов Александр Владимирович, главный специалист отдела ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 748-63-87. E-mail: ivanov11kgnc@yandex.ru.

Новиков Александр Владимирович, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела ФГУП «Крыловский

государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 723-66-07. E-mail: krilov1@krilov.spb.ru.

About the authors

Alexandr V. Ivanov, Chief Expert, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-87. E-mail: ivanov11kgnc@yandex.ru.

Alexandr V. Novikov, Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof., Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 723-66-07. E-mail: krilov1@krilov.spb.ru.

Поступила / Received: 03.12.19
Принята в печать / Accepted: 13.03.20
© Иванов А.В., Новиков А.В., 2020