

Повышение точности позиционирования в навигационной системе автономного необитаемого подводного аппарата

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов¹

Предложен модифицированный алгоритм позиционирования навигационной системы автономного необитаемого подводного аппарата, повышающий точность навигации в условиях малых наклонных расстояний между объектами позиционирования.

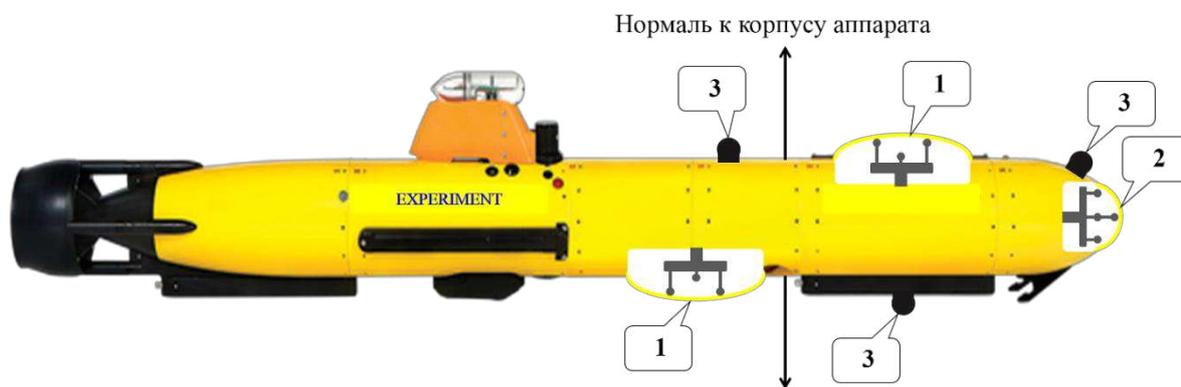
Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, навигационная система, алгоритм позиционирования.

1. Введение

В публикациях [1, 2] рассмотрен алгоритм позиционирования, ориентированный на минимально возможное количество приёмных трактов пеленгации и позволяющий определять координаты источника навигационного сигнала в трёхмерном пространстве.

В статье [3] даются оценки точностей позиционирования источника навигационного сигнала при использовании в навигационной системе фазового пеленгатора на базе четырёхэлементных пеленгационных антенн диаметрально-ортогональной (ДО) и пирамидальной геометрий.

В работе [4] предложена гидроакустическая навигационная система автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), использующая четырёхэлементные пеленгационные антенны ДО и пирамидальной геометрий, с размещением (рис. 1), позволяющим перекрывать переднюю, нижнюю и верхнюю полусферы приёма навигационного сигнала от маяка-ответчика объекта позиционирования.



- 1 – бортовые пеленгационные антенны диаметрально-ортогональной геометрии;
- 2 – носовая пеленгационная антенна пирамидальной геометрии;
- 3 – передающие антенны запросного сигнала.

Рис. 1. Размещение антенн навигационной системы АНПА

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 071-03-2022-001.

С целью расширения диапазона рабочих частот навигационной системы в качестве навигационных сигналов маяков-ответчиков объектов позиционирования рекомендовано использовать амплитудно-модулированные (АМ) сигналы с линейным детектированием в парциальных трактах приёма пеленгационных антенн АНПА [5].

Исходя из требований приемлемой технологической установки пеленгационных антенн в корпусе АНПА и характера изменения погрешностей оценок угловых координат источника навигационного сигнала по всем возможным направлениям выбранной полусферы приёма [3], предложены к применению: в качестве носовой антенны – четырёхэлементная антенна пирамидальной геометрии (форма правильной пирамиды), а в качестве бортовых антенн – четырёхэлементные антенны ДО-геометрии (форма правильного параллелепипеда) [2]. При этом следует обеспечить соответствующие геометрические параметры указанных антенн: для пирамидальной геометрии – размер рёбер основания пирамиды должен вдвое превышать её высоту, для ДО-геометрии – размер боковых рёбер параллелепипеда должен быть вдвое меньше размера рёбер основания.

Для указанных геометрических параметров пеленгационных антенн угловые координаты (пеленг φ и угол места θ) источника навигационного сигнала (передающей антенны) объекта позиционирования в системе координат пеленгационной антенны АНПА определяются на основе соответствующих тригонометрических соотношений.

Пеленгационная антенна пирамидальной геометрии:

$$\varphi = \left\{ \begin{array}{l} \arccos \left(\frac{2\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}}{\sqrt{(2\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + 3(\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } 5(\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}) \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{13} + \Delta\psi_{14} - 2\Delta\psi_{12}}{\sqrt{(2\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + 3(\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } 5(\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}) < 0 \end{array} \right\}; \quad (1)$$

$$[0 \leq \varphi < 2\pi];$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{1.1586(\Delta\psi_{12} + \Delta\psi_{13} + \Delta\psi_{14})}{\sqrt{(2\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + 3(\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + 1.3456(\Delta\psi_{12} + \Delta\psi_{13} + \Delta\psi_{14})^2}} \right) - \frac{\pi}{2};$$

$$[0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}]. \quad (2)$$

Пеленгационная антенна ДО-геометрии:

$$\varphi = \left\{ \begin{array}{l} \arccos \left(\frac{-\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} < 0 \end{array} \right\}; \quad (3)$$

$$[0 \leq \varphi < 2\pi];$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + (\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right) - \frac{\pi}{2};$$

$$[0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}]. \quad (4)$$

Переменные $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ в формулах (1) ÷ (4) являются инструментально измеренными разностями фаз колебаний демодулированного [5] навигационного АМ-сигнала маяка-ответчика объекта позиционирования для трёх пар парциальных трактов приёма пеленгационной антенны АНПА. Указанные соотношения являются частными случаями общего алгоритма позиционирования [1, 2] применительно к пеленгационным антеннам рассматриваемых геометрий.

Дальность D и наклонное расстояние R между пеленгационной антенной АНПА и передающей антенной маяка-ответчика объекта позиционирования могут быть оценены с использованием следующих зависимостей:

$$D = \frac{|h_1 - h_2|}{\operatorname{tg} \theta}, \quad R = \frac{|h_1 - h_2|}{\sin \theta}. \quad (5)$$

Здесь h_1 – глубина погружения АНПА, полученная от датчика глубины; h_2 – глубина погружения передающей антенны объекта позиционирования, переданная на АНПА в информационной составляющей навигационного сигнала.

Погрешности оценок угловых координат φ и θ источника навигационного сигнала обусловлены погрешностями инструментального измерения разностей фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ и погрешностями самого алгоритма позиционирования – алгоритмическими погрешностями. Последние являются результатом используемых ограничений при математическом синтезе алгоритма [1, 2] и зависят от местоположения объекта позиционирования, геометрии и размеров пеленгационных антенн АНПА.

Для наклонных расстояний между АНПА и объектом позиционирования, превышающих 20 м, влияние на точность пеленгования алгоритмических погрешностей на порядок меньше влияния погрешностей инструментального измерения разностей фаз. Соизмеримое влияние на точность позиционирования алгоритмические погрешности оказывают при малых наклонных расстояниях ($R < 10$ м) между АНПА и объектом позиционирования, что нежелательно при решении задачи позиционирования с повышенной точностью, например, заведения АНПА в торпедный отсек подводной лодки, в причальные устройства подводной платформы техобслуживания [6] или надводного роботизированного аппарата.

2. Модифицированный алгоритм позиционирования

В основу предлагаемого модифицированного алгоритма позиционирования положено то обстоятельство, что зависимости погрешностей позиционирования от угловых координат объекта позиционирования, имеющие место при использовании соотношений (1) ÷ (4), являются гладкими функциями, у которых малые изменения аргумента приводят к малым изменениям функции. Поэтому в предлагаемом алгоритме позиционирования расчётные угловые координаты передающей антенны объекта позиционирования принимаются за истинные. По измеренным разностям фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$, глубине погружения h_1 АНПА и глубине погружения h_2 передающей антенны объекта позиционирования, используя соотношения (1) ÷ (5), вычисляются сферические координаты передающей антенны объекта позиционирования. Полученные сферические координаты преобразуются в декартовы, на основе которых вычисляются расстояния от каждого из приёмных гидрофонов пеленгационной антенны до передающей антенны объекта позиционирования, используемые затем для определения вспомогательных угловых координат передающей антенны объекта позиционирования с составляющими только алгоритмической погрешности, что позволяет оценить приближённые алгоритмиче-

ские погрешности позиционирования и скорректировать результаты первоначально вычисленных угловых координат передающей антенны объекта позиционирования с уменьшенными алгоритмическими погрешностями.

На этой основе модифицированный алгоритм позиционирования предполагает в своей реализации следующий порядок действий и функционально связанных вычислительных операций.

1. В процессе позиционирования измеряются с достаточно малыми погрешностями: разности фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ колебаний демодулированного навигационного АМ-сигнала маяка-ответчика объекта позиционирования для трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны соответствующей полусферы приёма АНПА (см. рис. 1), глубина погружения h_1 АНПА и глубина погружения h_2 передающей антенны объекта позиционирования.

2. На основе соотношений (1) ÷ (5) в зависимости от полусферы приёма навигационного сигнала вычисляются сферические координаты передающей антенны объекта позиционирования: пеленг φ , угол места θ и наклонное расстояние R .

3. Вычисляются декартовы координаты x , y , z передающей антенны объекта позиционирования в системе координат пеленгационной антенны соответствующей полусферы приёма АНПА:

$$x = R \cos \theta \cos \varphi ; y = R \cos \theta \sin \varphi ; z = -R \sin \theta . \quad (6)$$

4. Для пеленгационных антенн АНПА с базовым установочным размером A (размер боковых рёбер параллелепипеда и высота пирамиды) в зависимости от полусферы приёма навигационного сигнала вычисляются расстояния S_1, S_2, S_3, S_4 от каждого из приёмных гидрофонов до передающей антенны объекта позиционирования.

Антенна ДО-геометрии:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{(A-x)^2 + y^2 + z^2}; S_2 = \sqrt{(A+x)^2 + y^2 + z^2}; \\ S_3 &= \sqrt{x^2 + (A-y)^2 + (A+z)^2}; S_4 = \sqrt{x^2 + (A+y)^2 + (A+z)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Антенна пирамидальной геометрии:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (A+z)^2}; S_2 = \sqrt{(1.155A-x)^2 + y^2 + z^2}; \\ S_3 &= \sqrt{(0.58A+x)^2 + (A-y)^2 + z^2}; S_4 = \sqrt{(0.58A+x)^2 + (A+y)^2 + z^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

5. Вычисляются вспомогательные угловые координаты φ_0, θ_0 передающей антенны объекта позиционирования с составляющими только алгоритмической погрешности.

Антенна ДО-геометрии:

$$\varphi_0 = \left\{ \begin{array}{l} \arccos \left(\frac{S_2 - S_1}{\sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_4 - S_3)^2}} \right), \text{ если } S_4 - S_3 \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{S_1 - S_2}{\sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_4 - S_3)^2}} \right), \text{ если } S_4 - S_3 < 0 \end{array} \right\}; \quad (9)$$

$$[0 \leq \varphi_0 < 2\pi];$$

$$\theta_0 = \arccos \left(\frac{S_3 + S_4 - S_1 - S_2}{\sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_4 - S_3)^2 + (S_3 + S_4 - S_1 - S_2)^2}} \right) - \frac{\pi}{2}; \quad (10)$$

$$[0 \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}].$$

Антенна пирамидальной геометрии:

$$\varphi_0 = \left\{ \begin{array}{l} \arccos \left(\frac{S_3 + S_4 - 2S_2}{\sqrt{(S_3 + S_4 - 2S_2)^2 + 3(S_4 - S_3)^2}} \right), \text{ если } 5(S_4 - S_3) \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{2S_2 - S_3 - S_4}{\sqrt{(S_3 + S_4 - 2S_2)^2 + 3(S_4 - S_3)^2}} \right), \text{ если } 5(S_4 - S_3) < 0 \end{array} \right\}; \quad (11)$$

$$[0 \leq \varphi_0 < 2\pi];$$

$$\theta_0 = \arccos \left(\frac{1.1586(3S_1 - S_2 - S_3 - S_4)}{\sqrt{(S_3 + S_4 - 2S_2)^2 + 3(S_4 - S_3)^2 + 1.3456(3S_1 - S_2 - S_3 - S_4)^2}} \right) - \frac{\pi}{2}; \quad (12)$$

$$[0 \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}].$$

6. Вычисляются приближённые алгоритмические погрешности позиционирования $\Delta\varphi_A$, $\Delta\theta_A$:

$$\Delta\varphi_A = \varphi_0 - \varphi; \quad \Delta\theta_A = \theta_0 - \theta. \quad (13)$$

7. Вычисляются скорректированные угловые координаты $\varphi_{\text{ск}}$, $\theta_{\text{ск}}$ передающей антенны объекта позиционирования с уменьшенными алгоритмическими погрешностями:

$$\varphi_{\text{ск}} = \varphi - \Delta\varphi_A; \quad \theta_{\text{ск}} = \theta - \Delta\theta_A. \quad (14)$$

В качестве показательного примера эффективности предложенного модифицированного алгоритма позиционирования на рис. 2 для пеленгационных антенн двух геометрий с базовым установочным размером $A = 0.06$ м показано расчётное уменьшение (в разях) максимальных алгоритмических погрешностей в зависимости от угла места позиционируемого объекта в области пеленгов $\varphi \in 0^\circ \dots 360^\circ$ относительно курса АНПА при наклонных расстояниях до объекта $R = 2$ и 5 м, измеряемых с погрешностью $\pm 2\%$, и погрешности инструментального измерения разностей фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ колебаний демодулированного АМ навигационного сигнала, равной $\pm 0.2^\circ$.

Представленные на рис. 2 зависимости показывают возможность значительного уменьшения алгоритмических погрешностей позиционирования в условиях малых наклонных расстояний между АНПА и объектом позиционирования, свидетельствуя о целесообразности применения предлагаемого алгоритма позиционирования в бортовой навигационной системе АНПА.

Кроме того, рассмотренный модифицированный алгоритм позиционирования оказывается востребованным на этапе предэксплуатационной градуировки антенн указанных геометрий фазового пеленгатора навигационной системы АНПА, выполняемой в лабораторных условиях по нестандартизованным методикам проверки функциональных элементов навигационного оборудования необитаемого подводного аппарата, которые относятся к категории малозатратных технологий и заслуживают самостоятельного рассмотрения.

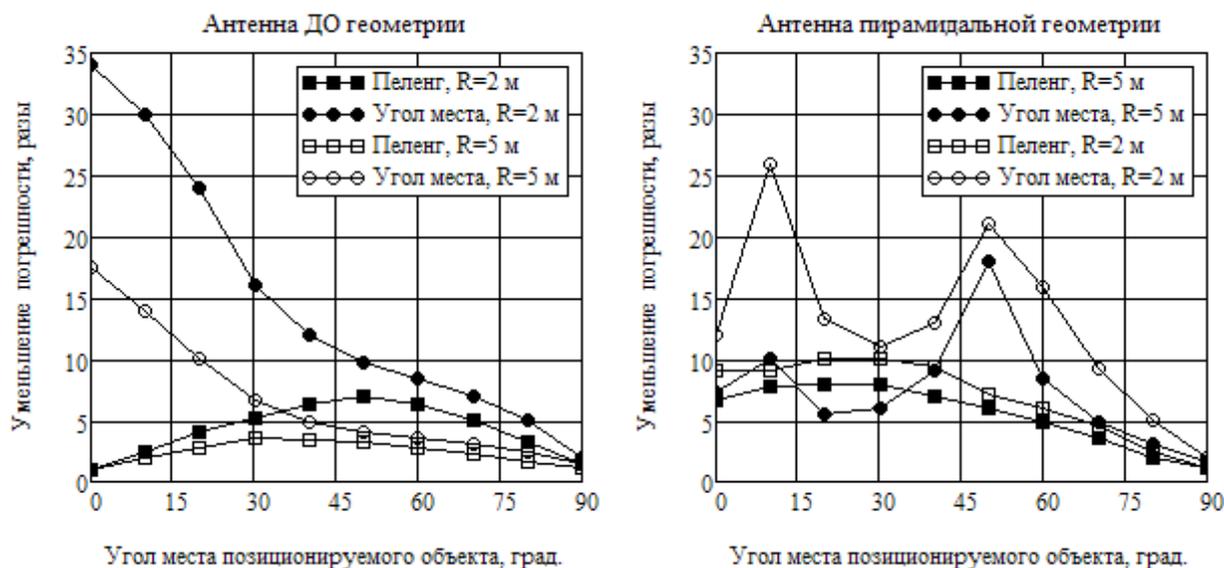


Рис. 2. Уменьшение алгоритмической погрешности позиционирования

3. Заключение

Предложенный модифицированный алгоритм позиционирования может быть использован при решении задачи приведения автономных необитаемых подводных аппаратов к объектам причаливания различного вида и функционального назначения. Техническая реализация алгоритма не требует дополнительных аппаратных затрат, так как выполняется на программном уровне. Алгоритм хорошо интегрируется в общую структуру навигационного комплекса автономного необитаемого подводного аппарата, не требуя значительных вычислительных ресурсов бортовой вычислительной системы. Возможность применения алгоритма при лабораторной оценке точностных характеристик фазовых пеленгаторов рассмотренной структуры указывает на его дополнительную практическую востребованность.

Литература

1. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
2. Патент РФ 2709100, МПК G01S 1/72. Способ определения местоположения подводного объекта / В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов, А. Е. Малашенко, Д. Д. Минаев. Заявка 2018122532, заявлено 19.06.2018, опубликовано 16.12.2019. Бюл. № 35.
3. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора // Вестник СибГУТИ. 2019. № 1. С. 92–101.
4. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Гидроакустическая навигационная система автономного необитаемого подводного аппарата // Сборник материалов РНТК «Современные проблемы телекоммуникаций», СибГУТИ, 2021. С. 159–168.
5. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Гидроакустический фазовый пеленгатор с амплитудно-модулированным навигационным сигналом // Вестник СибГУТИ. 2021. № 2. С. 14–26.
6. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О характеристиках фазового пеленгатора гидроакустической системы приведения автономного необитаемого подводного аппарата // Вестник СибГУТИ. 2021. № 1. С. 23–35.

Статья поступила в редакцию 29.04.2022;
переработанный вариант – 25.05.2022.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ, тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

Improving the positioning accuracy in the navigation system of an autonomous uninhabited underwater vehicle**Viktor G. Arsent'ev**

Candidate of technical sciences, Leading researcher, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), viktor.arsentev.51@mail.ru.

Gennagy I. Krivolapov

Candidate of technical sciences, Head of laboratory, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), krivolapov@sibsutis.ru.

A modified algorithm for positioning the navigation system of an autonomous uninhabited underwater vehicle is proposed. It increases the accuracy of navigation in conditions of small inclined distances between positioning objects.

Keywords: autonomous uninhabited underwater vehicle, navigation system, positioning algorithm.

References

1. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. Pozicionirovanie ob"ektov v gidroakusticheskoy navigacionnoj sisteme s ul'trakorotkoj bazoj [Positioning of objects in a hydroacoustic navigation system with an ultrashort base]. *Vestnik SibGUTI*, 2018, no. 4, pp. 66-75.
2. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I., Malashenko A.E., Minaev D.D. *Sposob opredeleniya mestopolozheniya podvodnogo ob"ekta* [Method of determining the location of an underwater object]. Patent RF, no. 2709100, IPC 2 G01S 1/72, 2019.
3. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. O vliyaniy geometricheskikh parametrov anteny na harakteristiki gidroakusticheskogo fazovogo pelengatora [On the influence of the geometrical parameters of the antenna on the characteristics of the hydroacoustic phase direction finder]. *Vestnik SibGUTI*, 2019, no. 1, pp. 92-101.
4. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. Gidroakusticheskaya navigacionnaya sistema avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Hydroacoustic navigation system of an autonomous uninhabited underwater vehicle]. *Sbornik materialov Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii: Sovremennye problemy telekommunikacij*, Novosibirsk, 2021, pp. 159-168.
5. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. Gidroakusticheskij fazovyj pelengator s amplitudno-modulirovannym navigacionnym signalom [Hydroacoustic phase direction finder with amplitude-modulated navigation signal]. *Vestnik SibGUTI*, 2021, no. 2, pp. 14-26.
6. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. O harakteristikah fazovogo pelengatora gidroakusticheskoy sistemy privedeniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [On the characteristics of the phase direction finder of the hydroacoustic guidance system of an autonomous uninhabited underwater vehicle]. *Vestnik SibGUTI*, 2021, no. 1, pp. 23-35.