

**Вареникова Анастасия Юрьевна** – Южный федеральный университет; e-mail: avarenikova@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

**Чернов Николай Николаевич** – e-mail: nnchernov@sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Varenikova Anastasiya Yur'evna** – Southern Federal University; e-mail: avarenikova@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

**Chernov Nikolay Nikolaevich** – e-mail: nnchernov@sfedu.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr of eng. sc.; professor.

УДК 656.61.087: 623.82

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-106-117

**А.А. Илларионов, С.В. Козловский, В.А. Сергеев**

### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*В статье описана имитационная модель функционирования бистатической гидролокационной системы, размещаемой на подвижных носителях. В качестве показателей эффективности в предлагаемой модели используются отношения сигнал/помеха в зависимости от курсового угла цели и глубин носителя гидролокатора и объекта поиска, площадь зоны обнаружения на заданной глубине цели при заданных мгновенной вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги за цикл локации, поля мгновенных вероятностей правильного обнаружения и среднеквадратических ошибок определения координат подводных объектов в зависимости от курсового угла и глубины цели, а также накопленная вероятность обнаружения цели, маневрирующей с заданной скоростью и курсом и на заданной глубине в заданный момент времени. Особенности модели являются учет кинематических характеристик поиска - скорости и глубины носителя и объекта, зависимостей отражательной способности от курсового и бистатического углов цели, характеристик распространения звука в море в лучевом приближении и технических параметров гидролокаторов. Также учитываются характеристики помех, обусловленных шумами морской среды, шумами носителя, гидродинамической составляющей помех, излучениями локальных источников, моностатических и бистатических реверберационных помех. Предусмотрена оценка влияния организации наблюдения, определяемой режимами работы каждого гидроакустического средства - моностатический, бистатический или комбинированный, когда одно или оба одновременно ГАС функционируют как в моностатическом, так и в бистатическом режимах. Имитационное моделирование производится по временным шагам, связанным с циклами локации. Программная реализация методики для персонального компьютера разработана на языке C++ в среде Builder-6 на основе использования технологии объектно-ориентированного проектирования. Представлены примеры расчетов вероятностей обнаружения и ошибок определения координат объектов бистатической гидролокационной системой, состоящей из двух взаимодействующих гидролокаторов типа экспортного изделия МГК-335ЭМ-03 в типовых для мелководного района условиях наблюдения и отрицательной рефракции скорости звука при движении носителя и цели на встречных курсах.*

*Бистатическая и моностатическая гидролокация; бистатическая гидроакустическая система подвижных носителей; имитационная модель; вероятности обнаружения и точности определения координат подводных объектов.*

A.A. Illarionov, S.V. Kozlovski, V.A. Sergeev

## IMITATING MODEL OF FUNCTIONING OF BISTATIC SONAR SYSTEM

*The imitating model of functioning of bistatic sonar system placed on moving carriers is described herein. As parameters of efficiency in offered model signal-to-clutter ratios depending on a relative bearing of the purpose and depths of the carrier sonar and entity of search, the area of a zone of detection on the set depth of the purpose are used at set instant probability of correct detection and probability of a false alarm for a cycle of a location, a field of instant probabilities of correct detection and root mean square errors of a position fixing of underwater entities depending on a relative bearing and depth of the purpose, and also the cumulative probability of detection of the purpose maneuvering with a set speed and a rate and on set depth for the set moment of time. Features of model are the account of kinematic characteristics of search of-speed and depth of the carrier and entity, associations of a reflectivity from course and bistatic angles of the purpose, characteristics of an acoustic propagation in the sea in radiation approaching and technical parameters of sonars. Also characteristics of the noises cause by noises of a marine environment, by noises of the carrier, a hydrodynamic component of noises, irradiations of local sources, monostatic and bistatic reverberation noises are considered. The estimation of effect of organization of the observation defined by modes of functioning in each sonar-monostatic, bistatic or combined, when one or both simultaneously function in monostatic and bistatic modes. Simulation modeling is effected on the time steps linked to cycles of a location. Program realization of a technique is developed for a personal computer in language C++ in Builder-6 environment on the basis of usage of technology of object-oriented designing. Examples of calculations of probabilities of detection and errors of a position fixing of entities bistatic sonar system are presented by the system consisting of two interfacing sonars of type of export product MGK-335EM-03 in sample for shallow-water area conditions of observation and a negative refraction of velocity of a sound at movement of the carrier and the purpose on counter rates.*

*Bistatic and monostatic hydrodetection and ranging; bistatic hydroultrasonic system of the mobile carriers; imitating model, probabilities of detection and accuracy of definition of coordinates of underwater objects.*

**Введение.** В последние годы при решении задач экологического мониторинга моря средствами гидроакустики серьезное внимание уделяется, наряду с традиционным методом моностатической гидролокации, методам мультистатической и бистатической гидролокации [1–4]. Принципы построения мультистатических гидролокаторов в значительной мере базируются на принципах построения многопозиционных (мультистатических) радиолокаторов [5], но имеют свою специфику, изложенную в работах [6, 7]. Для выполнения прогнозных оценок эффективности метода бистатической гидролокации в настоящее время отсутствует методический аппарат, обеспечивающий учет особенностей функционирования кораблей и судов экологического мониторинга в различных условиях наблюдения. Кроме того, расчеты выполняются только по показателям дальность действия в заданном направлении и вероятностные характеристики обнаружения цели в заданной точке зоны обзора гидролокатора.

Целью настоящей статьи является описание имитационной модели оценки эффективности гидролокаторов, размещаемых на подвижных носителях (судах экологического контроля) при использовании бистатической гидролокации.

Под бистатической гидроакустической системой (БГАС) понимается система, включающая в свой состав:

- ◆ два гидроакустических средства (ГАС), разнесенных в пространстве и установленных в некоторых позициях;
- ◆ радио-гидроакустический канал взаимодействия (связи) между ними;
- ◆ модуль совместной обработки информации и управления.

Каждое ГАС может работать в качестве только излучателя/ приемника или в качестве как излучателя, так и приемника (моностатическая гидролокация).

БГАС может применяться в следующих вариантах:

- ◆ Моностатической гидролокации каждого ГАС.
- ◆ Бистатической гидролокации с любым сочетанием пары излучатель-приемник.
- ◆ Комбинированной моно- и –бистатической гидролокации, когда одно из ГАС является и излучателем, и приемником, а другое ГАС – только приемником.
- ◆ Комбинированной моно- и –бистатической гидролокации обоих ГАС.

Если в бистатической системе каждая позиция выполняет функции излучения и приема, то такую систему необходимо рассматривать как четыре отдельных элемента – два моностатических и два бистатических. Если в этом случае оба средства работают одновременно в активном режиме (каждая на своей частоте), то дополнительно должны учитываться взаимные гидроакустические помехи.

БГАС является частным случаем мультистатической гидроакустической системы (МГАС).

**Постановка задачи.** В работе разработана модель расчета информационной эффективности БГАС, которая является развитием методики [8], созданной для МГАС, в части учета кинематики поиска и бистатической силы цели.

Предусмотрен учет как подкильных антенн, так и антенн с переменной глубиной погружения.

В основу модели положены следующие подходы к расчету полей сигналов и реверберации:

1. Расчет уровня эхосигнала с учетом его длительности и временных задержек при распространении сигналов по различным лучам [9].
2. «Строгий» (в рамках лучевой теории) расчет реверберационной помехи [10]. Для расчета реверберации вычисляется функция рассеяния канала по дальности (времени) и частоте [11]. Использование функции рассеяния канала позволило учесть искажение спектра реверберации за счет движения носителя, учесть форму огибающей эхо-сигнала, а также учесть такие специфические особенности как режим направленного излучения.
3. Модель формирования бистатической реверберации, включая геометрию рассеивающего объема в виде эллиптического слоя, построена с учетом особенностей, изложенных в работах [12–14].
4. Базовым параметром, определяющим все показатели информационной эффективности, является поле отношений сигнал-помеха.
5. Одной из особенностей методики является возможность расчета совместных характеристик обнаружения двух ГАС, одновременно работающих в моностатическом и бистатическом режимах гидролокации.

Представляемая модель учитывает следующие группы факторов:

- ◆ Кинематические характеристики поиска.
- ◆ Гидроакустические характеристики морской среды.
- ◆ Гидроакустические характеристики объекта поиска.
- ◆ Гидроакустические характеристики полей помех работе ГАС.
- ◆ Технические параметры гидроакустических средств БГАС.

Кинематические характеристики поиска моделируются в относительном движении (носители ГАС – неподвижны). Цель маневрирует прямолинейно, заданным курсом с равномерной скоростью  $v$  на заданной глубине (рис. 1).

Моделирование осуществляется по времени, шаги соответствуют циклу обзора гидролокации. На каждом шаге рассчитываются координаты объекта поиска и относительное расположение источника излучения, приемника и цели.

На рис. 1 обозначены: Ц-цель; И-источник излучения; П-приемник, b – разнесение между излучающей и приемной позициями.

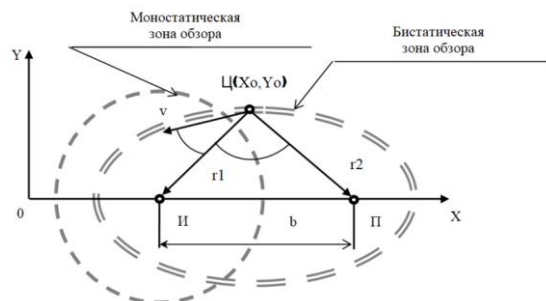


Рис. 1. Геометрия задачи

Форма зоны обнаружения при бистатической гидролокации приближенно аппроксимируется овалом Кассини [15–17], описываемым как

$$r_1 r_2 = \text{const.}$$

Уравнение моностатической гидролокации запишем в виде:

$$q^2 = \frac{P_a^2 \cdot R_s^2(\varphi) \cdot A^2(r, h, h_y, \nu) \cdot 10^{-0,2\beta(f) \cdot r}}{4r^4 \Delta F \left[ \frac{P_{шм}^2}{\gamma_0} + \frac{P_{\kappa}^2}{\gamma_{\kappa}} + \frac{P_{\varepsilon}^2}{\gamma_{\varepsilon}} + \frac{P_p^2}{\gamma_p} + \sum_{\kappa} \frac{P_{л\kappa}^2}{\gamma_{л\kappa}} \right] \cdot TП \cdot 10^{12}} \geq q_0^2, \quad (1)$$

Уравнение бистатической гидролокации имеет вид:

$$q^2 = \frac{P_a^2 \cdot R_s^2(\gamma) \cdot A_1(r_1, h_1, h_y, \nu_1) \cdot A_2(r_2, h_2, h_y, \nu_2) \cdot 10^{-0,1\beta(f) \cdot (r_1+r_2)}}{4r_1^2 r_2^2 \Delta F \left[ \frac{P_{шм}^2}{\gamma_0} + \frac{P_{\kappa}^2}{\gamma_{\kappa}} + \frac{P_{\varepsilon}^2}{\gamma_{\varepsilon}} + \frac{P_{бр}^2}{\gamma_{бр}} + \sum_{\kappa} \frac{P_{л\kappa}^2}{\gamma_{л\kappa}} \right] \cdot TП \cdot 10^{12}} \geq q_0^2, \quad (2)$$

где  $q$  – текущее отношение сигнал-помеха;  $q_0$  – порог обнаружения;  $P_a$  – давление излучаемого сигнала на оси ХН, Па;

$\gamma_0, \gamma_{\kappa}, \gamma_{\varepsilon}, \gamma_p, \gamma_{бр}, \gamma_{л\kappa}$  – коэффициенты помехоустойчивости приемной антенны по отношению к независимым помехам: шумам морской среды, шумам корабля-носителя, гидродинамическим составляющим помех, моностатическим и бистатическим реверберационным помехам, помехам локальных источников соответственно;

$P_{шм}, P_{\kappa}, P_{\varepsilon}, P_p, P_{бр}, P_{л\kappa}$  – приведенные уровни акустических давлений составляющих помех: шумов морской среды, собственной шумовой помехи, гидродинамических, моностатических и бистатических реверберационных, локальных, соответственно, на частоте 1 кГц в полосе 1 Гц, Па/√Гц;

$r$  – дистанция до цели моностатического гидролокатора, км;

$r_1, r_2$  – дистанции от излучающей антенны до цели и от цели до приемной антенны соответственно для бистатического гидролокатора, км;

$R_s(\varphi)$  – эквивалентный радиус цели в зависимости от моностатического угла  $\varphi$   $R_s(\gamma)$  – эквивалентный радиус цели в зависимости от бистатического угла  $\gamma$  (угол между излученным и отраженным от цели сигналом);

$A^2(r, h, h_u, \nu)$  – аномалия распространения звука для моностатического гидролокатора;

$A_1(r_1, h_1, h_u, \nu_i), A_2(r_2, h_u, h_2, \nu_j)$  – аномалии распространения звука по трассам: излучатель – цель и цель – приемная антенна;

$h$  – горизонт антенны для моностатического гидролокатора, м;

$h_u$  – глубина цели, м;

$h_1, h_2$  – горизонты излучающей антенны и приемной антенны, соответственно, для бистатического гидролокатора, м;

$\nu$  – акустические характеристики по трассе распространения звука для моностатического гидролокатора;

$\nu_1, \nu_2$  – акустические характеристики по трассам распространения звука для бистатического гидролокатора;

$\beta(f)$  – коэффициент пространственного затухания звуковых сигналов на частоте  $f$ , дБ/км;

$\Delta F$  – полоса частот преселектора приемного тракта, Гц;

$T\Pi$  – технические потери.

Гидроакустические характеристики объекта поиска определяются зависимостями моностатической и бистатической силы цели от курсового угла.

Эквивалентный радиус цели в режиме моностатической гидролокации:

$$R_s(f, \varphi) = R_s(f_0, \varphi) \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{0.2}, \quad (3)$$

где  $R_s(f_0, \varphi)$  – эквивалентный радиус цели на частоте  $f_0 = 1$  кГц;  $f$  – частота гидролокации, кГц;  $\varphi$  – курсовой угол цели (относительно излучателя).

Бистатическая сила цели определяется как

$$20 \lg R_{s_b}(f, \gamma) = 20 \lg R_s(f, \gamma) - \delta_0(\gamma), \quad \dots(4)$$

$\gamma$  – бистатический угол цели, град;  $\delta_0(\gamma)$  – величина функциональной поправки (дБ) в зависимости от бистатического угла цели, определяемая для объекта произвольной формы из рис. 2 (кривая получена с учетом результатов работы [18]).

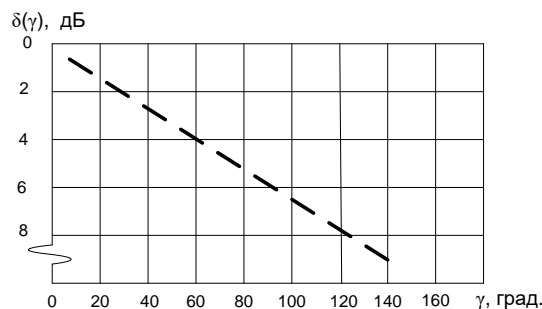


Рис. 2. Величина поправки к силе цели в зависимости от бистатического угла

Гидроакустические характеристики морской среды, спектрально-энергетические параметры помех учитываются также, как и в работе [4].

Вероятность правильного обнаружения цели в элементе разрешения гидролокатора, соответствующем текущему положению цели (X, Y), в j-ом цикле обзора определяется (в предположении рэлеевского тракта), как:

$$P_{по,j} = \exp\left(\frac{1}{q} \ln P_{лт}\right), \quad (5)$$

где  $P_{лт}$  – вероятность ложной тревоги за цикл обзора в i – м элементе разрешения.

Величина  $P_{по,j}$  представляет собой, так называемую, мгновенную вероятность обнаружения цели [19].

При движении цели в каждом цикле обзора изменяется дистанции, курсовой угол и бистатический угол. Это приводит к изменению мгновенной вероятности обнаружения.

Вероятность обнаружения цели впервые в n-ом цикле обзора (правило принятия решения «1» из «1») определяется, как:

$$P_{ПЕРВ}(n) = P_{по,n} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} (1 - P_{по,j}), \quad \dots\dots\dots(6)$$

где j – номер текущего цикла обзора.

Накопленная вероятность обнаружения (превышения порога хотя бы раз в «n» смежных циклах обзора) определяется, как:

$$P_H(n) = \sum_{j=1}^n P_{ПЕРВ}(j), \quad \dots\dots\dots(7)$$

Вероятность обнаружения при сложном правиле принятия решения (например «2 превышения порога в 3-х последовательных циклах обзора») рассчитывается, в соответствии с известными соотношениями (например, [19]).

В модели предусмотрен учет организации наблюдения взаимодействующих ГАС, т.е. использования комбинированных режимов. Если зоны обзора соседних ГАС (в моностатическом и/или в бистатическом режимах) перекрываются, то для обнаружения целей можно использовать совместную обработку данных, поступающих от обоих гидролокаторов. Обозначим зоны обзора, как: 1 – моностатическая для первого ГАС, 2 – моностатическая для второго ГАС, 3 – бистатическая для пары «излучатель первого ГАС-приемник второго ГАС», 4 – бистатическая для пары «излучатель второго ГАС-приемник первого ГАС». При поиске целей возможно одновременно использовать m перекрывающихся зон обзора (m=1÷4) в любом сочетании, что соответствует работе комбинированных режимов.

Вероятности правильного обнаружения цели и ложной тревоги в заданном элементе разрешения при реализации решающего правила вида «1 из m» рассчитываются по формулам:

$$P_{по,j}(m) = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{по,j,k}), \quad (8)$$

$$P_{лт,j}(m) = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{лт,j,k}), \quad (9)$$

где  $P_{по,j,k}$  – вероятность правильного обнаружения цели для j –го цикла локации k –й зоны обзора;  $P_{лт,j,k}$  – вероятность ложной тревоги для j-го цикла локации и k-й зоны обзора.

Соответственно, накопленная вероятность обнаружения БГАС в целом при выбранной организации наблюдения рассчитывается с использованием соотношений (7) с подстановкой в (6) величины  $P_{по,j}(m)$  вместо величины  $P_{по,j}$ .



- ◆ отношения сигнал/помеха (зависимость от курсового угла) на заданной глубине цели;
- ◆ отношения сигнал/помеха в координатах «дальность – глубина» при заданном курсовом угле цели;
- ◆ зона обнаружения или поле (зависимость от курсового угла) мгновенных вероятностей обнаружения цели на заданной глубине цели;
- ◆ мгновенные вероятности обнаружения в координатах «дальность – глубина» при заданном курсовом угле цели;
- ◆ площадь зоны обнаружения на заданной глубине цели при заданных мгновенной вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги за цикл локации;
- ◆ поле (зависимость от курсового угла) точности на заданной глубине цели;
- ◆ точности определения координат в координатах «дальность – глубина» при заданном курсовом угле цели;
- ◆ накопленная вероятность обнаружения цели, маневрирующей с заданной скоростью и курсом и на заданной глубине.

Последний показатель информационной эффективности является основным. При оценке координат целей и полей точности трассовый анализ при обработке гидроакустической информации и ошибки синхронизации и позиционирования в модели не учитываются.

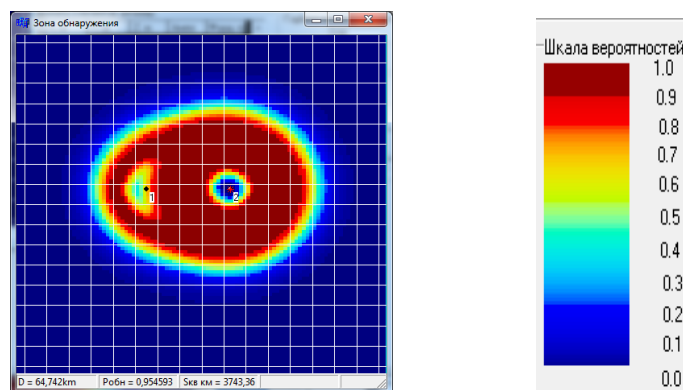


Рис. 4. Пример зоны обнаружения цели для бистатической ГАС: точка 1 соответствует положению И; точка 2 соответствует положению П

Результаты расчета отображаются в наглядной форме в виде графиков и растровых изображений с использованием цветowych шкал. Некоторые примеры отображения результатов работы имитационной модели представлены на рис. 4–6.

На рис. 4 и 5 показаны примеры полей вероятностей обнаружения цели и поле точности определения координат (СКО круговой ошибки места цели) для бистатической ГАС.

На рис. 6 показан пример зависимости кумулятивной вероятности обнаружения цели от номера цикла обзора в режимах моностатической кривая  $p2(j)$ , бистатической гидролокации – кривая  $p1(j)$  и в комбинированном (сочетание одного моностатического и одного бистатического) режиме – кривая  $p3(j)$  в различных точках начала движения объекта при встречных курсах носителей ГАС и цели. Координаты источника и приемника: И (5 км, 0 км), П (9 км, 0 км) и  $b=4$  км. Координаты цели: Ц (2,5 км, 3 км), Ц (7,5 км, 3 км) и Ц (11 км, 3 км). Скорость цели  $v=20$  м/с.



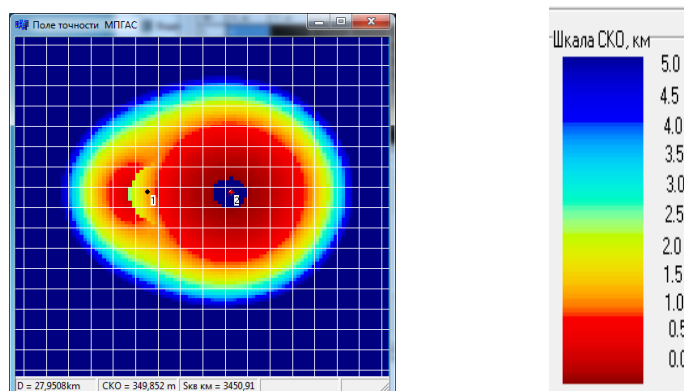


Рис. 5. Пример поля точности бистатической ГАС

Исходные данные для приведенного примера:

- ◆ отрицательная рефракция от поверхности до дна, градиент  $0,01 \text{ с}^{-1}$ ;
- ◆ глубина моря – 100 м, дно-ил, песок;
- ◆ волнение моря – 2 балла;
- ◆ коэффициент обратного объемного рассеяния –  $10^{-5}$ ;
- ◆ приведенный уровень собственных шумовых помех –  $0,02 \text{ Па}/\sqrt{\text{Гц}}$ ;
- ◆ моностатическая сила цели  $R_s(\varphi) \sim 5 \text{ м}$  (при острых курсовых углах);
- ◆ технические параметры ГАС аналогичны характеристикам экспортного изделия средней дальности действия МГК-335ЭМ-03 [20].

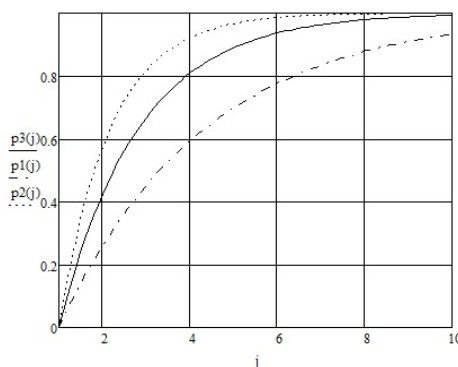


Рис. 6. Пример зависимости кумулятивной вероятности обнаружения цели от номера цикла обзора: бистатическая гидролокация – кривая  $p1(j)$ ; моностатическая гидролокация – кривая  $p2(j)$ ; комбинированный режим – кривая  $p3(j)$

Как видно из рис. 6 использование БГАС в комбинированном режиме (в пересекающихся зонах обзора) повышает накопленную вероятность обнаружения цели по сравнению с работой только в моностатическом и бистатическом режимах.

**Выводы.** Таким образом, разработанная имитационная модель позволяет оценить функционирования бистатической гидроакустической системы в различных режимах работы в реальных условиях наблюдения с учетом кинематических характеристик поиска, морской среды, помех и технических параметров ГАС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоус Ю.В., Козловский С.В., Сергеев В.А. Полистатический метод локации применительно к подвижным носителям // Труды VIII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2006. – С. 81-84.
2. Белоус Ю.В., Козловский С.В. Экологический мониторинг вредных районов с использованием моностатического и полистатического методов локации // Известия ТРТУ. – 2006. – № 12 (67). – С. 78-81.
3. Козловский С.В., Малый В.В., Микушин И.И. Использование мультистатического режима наблюдений в корабельных гидроакустических системах ВМС США // Сб. научных трудов ВМА им. Н.Г. Кузнецова. Ч. 2. – СПб.: ВМА, 2009. – С. 294-308.
4. Машошин А.И. Исследование эффективности применения бистатической гидролокации // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Нестор-История, 2014. – С. 358-360.
5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
6. Cox H. Fundamentals of Bistatic Active Sonar, in Y T Chan (ed.), Underwater Acoustic Data Processing, Kluwer Academic Publishers, 1989. – P. 3-24.
7. Островский Д.Б., Школьников И.С. Некоторые способы повышения скрытности работы гидролокатора подводной лодки // Системный анализ при создании и применении кораблей, вооружения и военной техники: Тематический сборник. Вып. 17. – ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 1 ЦНИИ МО РФ, 2006. – С. 138-145.
8. Козловский С.В., Сергеев В.А. Методика оценки информационной эффективности мультистатических систем гидролокации // Экология и развитие общества. – 2016. – № 3 (18). – С. 29-36.
9. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974. – 694 с.
10. Андреева И.Б., Гончаров В.Н. Методы расчета многолучевой реверберации и контрольные сравнения с экспериментом // В сб. «Проблемы акустики океана». – М.: Наука, 1984. – С. 69-77.
11. Применение цифровой обработки сигналов / под ред. Э. Оппенгейма. – М.: Мир, 1980. – 276 с.
12. Гаткин Н.Г., Геранин В.А., Карновский М.И., Красный Л.Г., Лозовик В.Г. Реверберация моря при разнесенных излучателе и приемнике // Акустический журнал. – 1969. – Т. XV. – Вып. 3. – С. 351-353.
13. Алексеев Б.Н., Ахметов Р.Х., Козловский С.В. О соотношении уровней эхосигнала и объемной реверберации моря при разнесенных излучателе и приемнике // IX Всесоюзная акустическая конференция: Тезисы докладов. – М., 1977. – С. 53-56.
14. Crowe D.V., Ellis D.D. Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – Vol. 89 (5). – P. 2207-2214.
15. Бундин Г.Г., Мясников В.В. Оценка дальности действия низкочастотных моностатического и бистатического гидролокаторов // Вопросы радиоэлектроники (серия радиолокационная техника). – Вып. 1. – М., 2012. – С. 108-116.
16. Волокитин С.Б., Гаврилов С.Ф. Некоторые закономерности применения бистатической гидролокации в авиационных противолодочных системах // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2016. – С. 402-405.
17. Колесниченко В.В., Соскунова И.А., Школьников И.С., Шутов А.Л. Некоторые вопросы эффективности режима мультистатической гидролокации // Гидроакустика. – 2014. – Вып. 19 (1). – С. 103-107.
18. Илларионов А.А., Козловский С.В., Чернов В.П. Экспериментальная оценка бистатической силы цели при различных видах зондирующих сигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 9 (146). – С. 160-165.
19. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
20. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука, 2004. – 410 с.

## REFERENCES

1. *Belous Yu.V., Kozlovskiy S.V., Sergeev V.A.* Polistaticheskii metod lokatsii primeni-tel'no k podvizhnym nositelyam [Polystatic method of them obilecarier location], *Trudy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [VIII International conference proceedings «Applied Technologies of the Hydroacoustics and Hydrophysics»]. Saint Petersburg.: Nauka, 2006, pp. 81-84.
2. *Belous Yu.V., Kozlovskiy S.V.* Ekologicheskii monitoring vrednykh rayonov s ispol'zovaniem monostaticheskogo i polistaticheskogo metodov lokatsii [Environmental monitoring of hazardous areas by using monostatic and polystatic location methods], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2006, No. 12 (67), pp. 78-81.
3. *Kozlovskiy S.V., Malyy V.V., Mikushin I.I.* Ispol'zovanie mul'tistaticheskogo rezhima nablyudeniya v korabel'nykh gidroakusticheskikh sistemakh VMS SShA [Use penetrating multistatic mode of observation in naval sonar systems the U.S. Navy], *Sb. nauchnykh trudov VMA im. N.G. Kuznetsova* [Collection of scientific works of the VMA to them. N.G. Kuznetsova]. Part 2. St. Petersburg: VMA, 2009, pp. 294-308.
4. *Mashoshin A.I.* Issledovanie effektivnosti primeneniya bistaticheskoy gidrolokatsii [Investigation of bistatic sonar effectiveness], *Trudy XII Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of XII All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2014, pp. 358-360.
5. *Chernyak V.S.* Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multiposition radiolocation]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
6. *Cox H.* Fundamentals of Bistatic Active Sonar, in Y T Chan (ed.), *Underwater Acoustic Data Processing*, Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 3-24.
7. *Ostrovskiy D.B., Shkol'nikov I.S.* Nekotorye sposoby povysheniya skrytnosti raboty gidrolokatora podvodnoy lodki [Some ways to improve stealth of operation of the sonar submarine], *Sistemnyy analiz pri sozdanii i primeneniі korably, vooruzheniya i voennoy tekhniki: Tematicheskii sbornik* [System analysis in the creation and use of ships, weapons and military equipment: Thematic collection, Issue 17. VMA to them. N.G. Kuznetsova, 1 TSNII MO RF, 2006], pp. 138-145.
8. *Kozlovskiy S.V., Sergeev V.A.* Metodika otsenki informatsionnoy effektivnosti mul'tistaticheskikh sistem gidrolokatsii [Methods of information efficiency of multistatic hydrolocation], *Ekologiya i razvitie obshchestva* [Ecology and development of society], 2016, No. 3 (18), pp. 29-36.
9. *Akustika okeana* [Acoustics of the ocean], under the ed. L.M. Brekhovskikh. Moscow: Nauka, 1974, 694 p.
10. *Andreeva I.B., Goncharov V.N.* Metody rascheta mnogoluchevoy reverberatsii i kontrol'nye sravneniya s eksperimentom [Methods for calculating multipath reverberation and control comparison with experiment], *V sb. «Problemy akustiki okeana»* [Digest «Ocean Acoustics Issues»]. Moscow: Nauka, 1984, pp. 69-77.
11. *Primenenie tsifrovoy obrabotki signalov* [Applications of Digital Signal Processing], under the ed. E. Oppengeyma. Moscow: Mir, 1980.
12. *Gatkin N.G., Geranin V.A., Karnovskiy M.I., Krasnyy L.G., Lozovik V.G.* Reverberatsiya morya pri raznesennykh izluchatele i priemnike [Sea reverb with separated transmitter and receiver], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij zhurnal], 1969, Vol. XV, Issue 3, pp. 351-353, 276 p.
13. *Alekseev B.N., Akhmetov R.Kh., Kozlovskiy S.V.* O sootnoshenii urovney ekhoshignala i ob'emnoy reverberatsii morya pri raznesennykh izluchatele i priemnike [About a parity of levels echo and volume reverberation of the sea at the carried radiator and the receiver], *IX Vsesoyuznaya akusticheskaya konferentsiya: Tezisy dokladov* [IX All-Union acoustic conference: Theses of reports]. Moscow, 1977, pp. 53-56.
14. *Crowe D.V., Ellis D.D.* Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, Vol. 89 (5), pp. 2207-2214.
15. *Bundin G.G., Myasnikov V.V.* Otsenka dal'nosti deystviya nizkochastotnykh monostaticheskogo i bistaticheskogo gidrolokatorov [Estimation of the range of the low-frequency monostatic and bistatic sonars], *Voprosy radioelektroniki (seriya radiolokatsionnaya tekhnika)* [Questions of radio electronics (radar technology series)], Issue 1. Moscow, 2012, pp. 108-116.

16. *Volokitin S.B., Gavrilov S.F.* Nekotorye zakonomernosti primeneniya bistaticheskoy gidrolokatsii v aviatsionnykh protivolodochnykh sistemakh [Some results in the use of bistatic sonar in anti-aircraft systems], *Trudy XIII Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of XIII All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”]. Saint-Petersburg, 2016, pp. 402-405.
17. *Kolesnichenko V.V., Soskunova I.A., Shkol'nikov I.S., Shutov A.L.* Nekotorye voprosy effektivnosti rezhima mul'tistaticheskoy gidrolokatsii [Some questions of the effectiveness of the penetrating multistatic sonar], *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2014, Issue 19 (1), pp. 103-107.
18. *Illarionov A.A., Kozlovskiy S.V., Chernov V.P.* Eksperimental'naya otsenka bistaticheskoy sily tseli pri razlichnykh vidakh zondiruyushchikh signalov [Experimental evaluation of bistatic target strength of complex object at different types of probing signals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskoe nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 9 (146), pp. 160-165.
19. *Evyutov A.P., Mit'ko V.B.* Inzhenernye raschety v gidroakustike [Engineering calculations in hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 288 p.
20. *Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V.* Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika. Sostoyanie i aktual'nye problem [Ship sonar equipment: the state and actual problems]. Saint-Petersburg: Nauka, 2004, 410 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

**Илларионов Алексей Александрович** – Научно-исследовательский центр радиоэлектронного вооружения и формирования информационных ресурсов ВМФ; e-mail: sk\_tzse@mail.ru; 196604, Санкт-Петербург-Пушкин, ул. Красной Звезды, 31; тел.: 88124652706; начальник отдела.

**Козловский Сергей Викторович** – e-mail: sk\_tzse@mail.ru; с.н.с.; к.т.н.; с.н.с.

**Сергеев Владимир Алексеевич** – Закрытое акционерное общество «Аквамарин»; e-mail: vladimir.sergeev.2011@mail.ru, 198027, Санкт-Петербург, ул. Баррикадная, 17; тел.: 88123292691; главный специалист; к.т.н.; доцент.

**Illarionov Alexey Alexandrovich** – Scientific-research center of radio electronic equipment and formation of information resources of the Navy; e-mail: sk\_tzse@mail.ru; 31, Red Stars street, Saint-Petersburg-Pushkin, 196604, Russia; phone: +78124652706; head of division.

**Kozlovskiy Sergey Viktorovich** – e-mail: sk\_tzse@mail.ru; senior researcher; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Sergeev Vladimir Alexeevich** – The closed joint-stock «Aquamarin»; e-mail: vladimir.sergeev.2011@mail.ru, 17, Barricadnya street, S.-Peterburg, 198097, Russia; phone: +781232926-91; the main specialist; cand. of eng. sc.; the senior lecturer.