

Б. И. Филиппов, канд. техн. наук, доц., Filippov-boris@rambler.ru,
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)

Архитектура гидроакустической навигационной системы с короткой базой для приведения подводного аппарата к стыковочному модулю

Объектом исследования являются принципы и методы гидроакустического приведения автономного подводного аппарата к носителю. При решении задачи построения гидроакустической навигационной системы (ГНС) приведения основными системными вопросами являются вопросы выбора приемлемой точки зрения технической реализации способа определения местоположения объекта в зоне приведения и оценки параметров предлагаемой навигационной системы. В работе обоснована целесообразность построения аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы приведения в виде совмещенной информационно-навигационной комбинированной по базе антенн системы, в которой могут применяться гидроакустические навигационные системы с короткой базой. В качестве навигационных предложено использовать сигналы данных, которыми обмениваются стыковочный модуль и автономный подводный аппарат по результатам измерения взаимных навигационных параметров. Предлагаемый образец аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы приведения (АГСП) ближнего действия предназначен для работы в составе комплекса технических средств, обеспечивающих подводную стыковку автономного подводного аппарата с носителем. Полученные количественные характеристики ГНС с короткой базой являются исходными показателями первого приближения при выборе необходимых параметров навигационного сигнала и разработке структуры АГСП, предназначенной для решения задачи автоматического приведения автономного подводного аппарата к стыковочному модулю заданного носителя.

Ключевые слова: гидроакустическая навигационная система, автономный подводный аппарат, стыковочный модуль, навигационные параметры

Введение

Обратимся к исследованию возможности построения аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы приведения в виде совмещенной информационно-навигационной комбинированной по базе антенн системы, в которой могут применяться гидроакустические навигационные системы с короткой базой. В качестве навигационных предложено использовать сигналы данных, которыми обмениваются стыковочный модуль и автономный подводный аппарат по результатам измерения взаимных навигационных характеристик.

Как правило, управление автономными подводными аппаратами (АПА) осуществляется на основе алгоритмов с большим набором коэффициентов и эмпирических зависимостей [1–4]. Такой подход обеспечивает решение в ряде частных случаев. В процессе длительного автономного движения АПА такие алгоритмы приводят к большим ошибкам.

В работе [5] показан алгоритм оптимального программно-позиционного управления АПА на основе теории оптимального управления, который исключает процедуру эмпирического подбора коэффициентов в законах управления и позволяет осуществить доставку полезной нагрузки к объекту стыковки. В работах [6, 7] предлагается для адаптивного

расчета траектории движения робота использовать видеoinформацию с монокамер (или сканирующего сонара высокого разрешения). С учетом ограниченной прозрачности водной среды использование видеокамеры (или сонаров) на расстояниях более 50 м представляется проблематичным. В работах [9, 10] описаны навигационные робототехнические комплексы, включающие автономные подводные и надводные аппараты. Данные комплексы решают только навигационные задачи. В статье [9] показано, что при натурных испытаниях погрешность определения координат АПА составляла 8...16 м. Погрешность определения координат в работе [10] не указана.

Разрабатываемый образец аппаратуры является частью многофункциональной сети гидроакустической связи и должен обеспечивать приведение АПА в ближней зоне на дистанциях, не превышающих 300 м, и его стыковку с носителем. Для этого осуществляется взаимное определение дистанции и углового положения стыковочного модуля носителя и АПА относительно друг друга. Основные вопросы построения таких сетей рассмотрены в работах [11–16]. Определение дистанции и углового положения стыковочного модуля носителя и АПА относительно друг друга сопровождается передачей данных между ними по гидроакустическому каналу связи.

Постановка задачи

Местоположение объекта (в данном случае АПА) в гидроакустической навигационной системе (ГНС) приведения, в зависимости от выбранной (или заданной) системы координат и алгоритма процедуры привода, может быть определено на основе вычисления следующих базовых навигационных параметров:

- текущих декартовых координат объекта приведения;
- текущих угловых координат объекта приведения: азимута (курса) и угла места (по глубине погружения);
- текущего наклонного расстояния до объекта приведения.

Для определения вышеуказанных характеристик целесообразно использовать многопозиционную (по числу разнесенных в пространстве приемников гидроакустических сигналов) навигационную систему приведения. Достоинством многопозиционной системы приведения кроме универсальности использования является возможность создания на ее базе высокопомехоустойчивого (с дополнительной пространственно-временной обработкой) канала передачи информации от АПА к стыковочному модулю (СМ) судна сопровождения, за счет чего может быть получена совмещенная информационно-навигационная система с улучшенными энергетическими показателями [17].

При вычислении декартовых координат объекта в многопозиционной навигационной системе минимально необходимое число пространственно разнесенных приемников гидроакустических сигналов должно быть не менее четырех.

Система уравнений, которая может быть использована для нахождения декартовых координат объекта приведения в четырехпозиционной навигационной системе, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C^2\tau_{10}^2(t) = [X_1(t) - X_0(t)]^2 + \\ + [Y_1(t) - Y_0(t)]^2 + [Z_1(t) - Z_0(t)]^2; \\ C^2\tau_{20}^2(t) = [X_2(t) - X_0(t)]^2 + \\ + [Y_2(t) - Y_0(t)]^2 + [Z_2(t) - Z_0(t)]^2; \\ C^2\tau_{30}^2(t) = [X_3(t) - X_0(t)]^2 + \\ + [Y_3(t) - Y_0(t)]^2 + [Z_3(t) - Z_0(t)]^2; \\ C^2\tau_{40}^2(t) = [X_4(t) - X_0(t)]^2 + \\ + [Y_4(t) - Y_0(t)]^2 + [Z_4(t) - Z_0(t)]^2, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $X_0(t)$, $Y_0(t)$, $Z_0(t)$ — текущие декартовы координаты объекта приведения (координаты передающей антенны ПА); $X_1(t)$, $Y_1(t)$, $Z_1(t)$; $X_2(t)$, $Y_2(t)$, $Z_2(t)$; $X_3(t)$, $Y_3(t)$, $Z_3(t)$; $X_4(t)$, $Y_4(t)$, $Z_4(t)$ — текущие декартовы координаты приемных антенн четырехпозиционной ГНС, обусловленные изменением пространственной ориентации СМ; $\tau_{10}(t)$, $\tau_{20}(t)$, $\tau_{30}(t)$, $\tau_{40}(t)$ — текущее время распространения навигационного сигнала от антенны передатчика объекта приведения до соответствующей приемной антенны СМ четырехпозиционной ГНС; C — средневзвешенная по глубине скорость распространения звука в зоне приведения.

Решим систему уравнений (1) методом Гаусса [18], введя дополнительные обозначения:

$$\begin{aligned} b_1(t) &= C^2[\tau_{10}^2(t) - \tau_{20}^2(t)] - \\ &- X_1^2(t) - Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_2^2(t) + Y_2^2(t) + Z_2^2(t); \\ b_2(t) &= C^2[\tau_{10}^2(t) - \tau_{30}^2(t)] - \\ &- X_1^2(t) - Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_3^2(t) + Y_3^2(t) + Z_3^2(t); \\ b_3(t) &= C^2[\tau_{10}^2(t) - \tau_{40}^2(t)] - \\ &- X_1^2(t) - Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_4^2(t) + Y_4^2(t) + Z_4^2(t); \\ a_{11}(t) &= 2[X_2(t) - X_1(t)]; a_{12}(t) = 2[Y_2(t) - Y_1(t)]; \\ a_{13}(t) &= 2[Z_2(t) - Z_1(t)]; \\ a_{21}(t) &= 2[X_3(t) - X_1(t)]; a_{22}(t) = 2[Y_3(t) - Y_1(t)]; \\ a_{23}(t) &= 2[Z_3(t) - Z_1(t)]; \\ a_{31}(t) &= 2[X_4(t) - X_1(t)]; a_{32}(t) = 2[Y_4(t) - Y_1(t)]; \\ a_{33}(t) &= 2[Z_4(t) - Z_1(t)]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h_1(t) &= a_{22}(t)a_{33}(t) - a_{23}(t)a_{32}(t); \\ h_2(t) &= a_{13}(t)a_{32}(t) - a_{12}(t)a_{33}(t); \\ h_3(t) &= a_{12}(t)a_{23}(t) - a_{13}(t)a_{22}(t); \\ h_4(t) &= a_{23}(t)a_{31}(t) - a_{21}(t)a_{33}(t); \\ h_5(t) &= a_{11}(t)a_{33}(t) - a_{13}(t)a_{31}(t); \\ h_6(t) &= a_{13}(t)a_{21}(t) - a_{11}(t)a_{23}(t); \\ h_7(t) &= a_{21}(t)a_{32}(t) - a_{22}(t)a_{31}(t); \\ h_8(t) &= a_{12}(t)a_{31}(t) - a_{11}(t)a_{32}(t); \\ h_9(t) &= a_{11}(t)a_{22}(t) - a_{12}(t)a_{21}(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= a_{11}(t)[a_{22}(t)a_{33}(t) - a_{23}(t)a_{32}(t)] + \\ &+ a_{12}(t)[a_{23}(t)a_{31}(t) - a_{21}(t)a_{33}(t)] + \\ &+ a_{13}(t)[a_{21}(t)a_{32}(t) - a_{22}(t)a_{31}(t)]. \end{aligned}$$

Тогда текущие декартовы координаты объекта приведения, с учетом обозначений (2), определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} X_0(t) &= \frac{b_1(t)h_1(t) + b_2(t)h_2(t) + b_3(t)h_3(t)}{\gamma(t)}; \\ Z_0(t) &= \frac{b_1(t)h_7(t) + b_2(t)h_8(t) + b_3(t)h_9(t)}{\gamma(t)}; \\ Y_0(t) &= \frac{b_1(t)h_4(t) + b_2(t)h_5(t) + b_3(t)h_6(t)}{\gamma(t)}. \end{aligned} \quad (3)$$

При агрегатировании аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы (АГСП), предполагающем создание отдельного модуля аппаратно-программных средств для измерения наклонного расстояния, текущие декартовы координаты объекта приведения могут быть найдены с использованием несколько видоизмененных зависимостей (2) и (3):

$$\begin{aligned} X_0(t) &= \frac{g_1(t)h_1(t) + g_2(t)h_2(t) + g_3(t)h_3(t)}{\gamma(t)}; \\ Y_0(t) &= \frac{g_1(t)h_4(t) + g_2(t)h_5(t) + g_3(t)h_6(t)}{\gamma(t)}; \\ Z_0(t) &= \frac{g_1(t)h_7(t) + g_2(t)h_8(t) + g_3(t)h_9(t)}{\gamma(t)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} g_1(t) &= R_{10}^2(t) - R_{20}^2(t) - X_1^2(t) - \\ &- Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_2^2(t) + Y_2^2(t) + Z_2^2(t); \\ g_2(t) &= R_{10}^2(t) - R_{30}^2(t) - X_1^2(t) - \\ &- Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_3^2(t) + Y_3^2(t) + Z_3^2(t); \\ g_3(t) &= R_{10}^2(t) - R_{40}^2(t) - X_1^2(t) - \\ &- Y_1^2(t) - Z_1^2(t) + X_4^2(t) + Y_4^2(t) + Z_4^2(t); \end{aligned}$$

$R_{10}(t)$, $R_{20}(t)$, $R_{30}(t)$, $R_{40}(t)$ — текущие наклонные расстояния между приемными антеннами СМ и передающей антенной ПА в четырехпозиционной ГНС приведения.

Если пространство приведения ограничивается полусферой, конечная точка приведения АПА совмещена с началом координат системы отсчета, а в процедуре приведения используются угловые координаты объекта приведения (текущий курс $\varphi_0(t)$ и текущий угол места $\theta_0(t)$), то последние могут быть выражены через соответствующие декартовы координаты:

$$\begin{aligned} \varphi_0(t) &= \frac{180}{\pi} \arctg \frac{X_0(t)}{Z_0(t)} \quad [^\circ]; \\ \theta_0(t) &= \frac{180}{\pi} \arctg \frac{Y_0(t)}{Z_0(t)} \quad [^\circ]. \end{aligned} \quad (5)$$

Текущее наклонное расстояние от конечной точки приведения до передающей антенны объекта приведения $R_0(t)$ также может быть определено через его текущие декартовы коор-

динаты, расчетное соотношение при этом имеет известный [19] вид:

$$R_0(t) = \sqrt{X_0^2(t) + Y_0^2(t) + Z_0^2(t)}. \quad (6)$$

Погрешности оценки параметров ГНС с короткой базой

В условиях отсутствия априорной информации о конкретном исполнении СМ, его геометрии и погрешности траекторных расчетов при учете рефракционных искажений навигационного сигнала будем на этапе первого приближения считать, что точность оценки указанных выше характеристик навигационной системы существенно зависит только от погрешностей (условно назовем их инструментальными) определения трех параметров ГНС. Такими параметрами являются: средневзвешенная по глубине скорость распространения звука в зоне приведения, время распространения навигационного сигнала между передающей антенной объекта приведения и каждой из четырех пространственно разнесенных приемных антенн СМ и точность измерения в процессе приведения пространственных координат приемных антенн СМ.

Обозначим абсолютную среднеквадратическую погрешность определения времени распространения навигационного сигнала в четырехпозиционной системе приведения Δt , абсолютную среднеквадратическую погрешность оценки средневзвешенной по глубине скорости распространения звука в зоне приведения Δc , а абсолютную среднеквадратическую погрешность определения каждой из трех координат приемных антенн СМ соответственно Δx .

В условиях отсутствия информации о конкретной геометрии, конструкции СМ и погрешностях определения его возможного пространственного положения в процессе приведения такое допущение (одинаковость погрешностей по всем трем координатам) в отношении последней составляющей погрешности Δx позволяет получить оценку сверху — выявить максимальное влияние указанной погрешности.

Для фиксированного момента времени t , согласно методике, изложенной в работе [14], можно получить оценки абсолютных среднеквадратических погрешностей вычисления декартовых координат объекта приведения:

$$\begin{aligned}
skpX_0 &= \sqrt{\Delta C^2 \left(\frac{\partial X_0}{\partial C}\right)^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial X_0}{\partial \tau_{i0}}\right)^2 + \Delta x^2 \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial X_0}{\partial X_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial X_0}{\partial Y_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial X_0}{\partial Z_i}\right)^2 \right]}; \\
skpY_0 &= \sqrt{\Delta C^2 \left(\frac{\partial Y_0}{\partial C}\right)^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Y_0}{\partial \tau_{i0}}\right)^2 + \Delta x^2 \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Y_0}{\partial X_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Y_0}{\partial Y_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Y_0}{\partial Z_i}\right)^2 \right]}; \\
skpZ_0 &= \sqrt{\Delta C^2 \left(\frac{\partial Z_0}{\partial C}\right)^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Z_0}{\partial \tau_{i0}}\right)^2 + \Delta x^2 \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Z_0}{\partial X_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Z_0}{\partial Y_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial Z_0}{\partial Z_i}\right)^2 \right]}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Преобразуя выражения (7), с учетом обозначений (2) и соотношений (3) окончательно получаем:

$$\begin{aligned}
skpX_0 &= \sqrt{\alpha_1^2 \Delta C^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=1}^4 \beta_i^2 + \Delta x^2 \sum_{i=1}^{12} \xi_i^2}; \\
skpY_0 &= \sqrt{\alpha_2^2 \Delta C^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=5}^8 \beta_i^2 + \Delta x^2 \sum_{i=13}^{24} \xi_i^2}; \\
skpZ_0 &= \sqrt{\alpha_3^2 \Delta C^2 + \Delta \tau^2 \sum_{i=9}^{12} \beta_i^2 + \Delta x^2 \sum_{i=25}^{36} \xi_i^2},
\end{aligned} \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \frac{2C}{\gamma} [(\tau_{10}^2 - \tau_{20}^2)h_1 + (\tau_{10}^2 - \tau_{30}^2)h_2 + (\tau_{10}^2 - \tau_{40}^2)h_3]; \\
\alpha_2 &= \frac{2C}{\gamma} [(\tau_{10}^2 - \tau_{20}^2)h_4 + (\tau_{10}^2 - \tau_{30}^2)h_5 + (\tau_{10}^2 - \tau_{40}^2)h_6]; \\
\alpha_3 &= \frac{2C}{\gamma} [(\tau_{10}^2 - \tau_{20}^2)h_7 + (\tau_{10}^2 - \tau_{30}^2)h_8 + (\tau_{10}^2 - \tau_{40}^2)h_9]; \\
\beta_1 &= \frac{2C^2 \tau_{10} (h_1 + h_2 + h_3)}{\gamma}; \\
\beta_2 &= \frac{2C^2 \tau_{20} h_1}{\gamma}; \dots; \beta_{12} = \frac{2C^2 \tau_{40} h_9}{\gamma}; \\
\psi_1 &= C^2 (\tau_{10}^2 - \tau_{20}^2); \psi_2 = C^2 (\tau_{10}^2 - \tau_{30}^2); \\
\psi_3 &= C^2 (\tau_{10}^2 - \tau_{40}^2); \\
m_1 &= X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2; \dots m_4 = X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2; \\
n_{11} &= 2(X_2 - X_3); n_{12} = 2(X_2 - X_4); \dots n_{33} = 2(Z_3 - Z_4); \\
k_{11} &= 2X_1 X_2; k_{12} = 2X_1 X_3; \dots k_{16} = 2X_3 X_4; \\
k_{21} &= 2Y_1 Y_2; k_{22} = 2Y_1 Y_3; \dots k_{26} = 2Y_3 Y_4; \\
k_{31} &= 2Z_1 Z_2; k_{32} = 2Z_1 Z_3; \dots k_{36} = 2Z_3 Z_4; \\
s_1 &= b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3; s_2 = b_1 h_4 + b_2 h_5 + b_3 h_6; \\
s_3 &= b_1 h_7 + b_2 h_8 + b_3 h_9; \\
w_1 &= n_{23} Z_2 - n_{22} Z_3 + n_{21} Z_4; \\
w_2 &= a_{22} Z_4 - a_{32} Z_3 - n_{23} Z_1; \dots w_{12} = a_{11} Y_3 - a_{21} Y_2 - n_{11} Y_1; \\
\xi_1 &= \frac{4[\gamma X_1 (n_{32} Y_3 - n_{31} Y_4 - n_{33} Y_2) - s_1 w_1]}{\gamma^2}; \\
\xi_2 &= \frac{4[\gamma X_2 (a_{33} Y_3 - a_{23} Y_4 + n_{33} Y_1) - s_1 w_2]}{\gamma^2}; \dots \\
\xi_{36} &= \frac{4[\gamma Z_4 (a_{22} X_2 - a_{12} X_3 + n_{21} X_1) - s_3 w_{12}]}{\gamma^2}.
\end{aligned}$$

Аналогично, на основе соотношений (5) и (8), получаем оценки абсолютных среднеквадратических погрешностей вычисления угловых координат объекта приведения:

$$\begin{aligned}
skp\varphi_0 &= \frac{180 \sqrt{(skpX_0)^2 Z_0^2 + (skpZ_0)^2 X_0^2}}{\pi(X_0^2 + Z_0^2)}; \\
skp\theta_0 &= \frac{180 \sqrt{(skpY_0)^2 Z_0^2 + (skpZ_0)^2 Y_0^2}}{\pi(Y_0^2 + Z_0^2)}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Оценка абсолютной среднеквадратической погрешности вычисления наклонного расстояния до объекта приведения, с учетом зависимостей (6) и (8), характеризуется выражением

$$\begin{aligned}
skpR_0 &= \\
&= \sqrt{\frac{X_0^2 (skpX_0)^2 + Y_0^2 (skpY_0)^2 + Z_0^2 (skpZ_0)^2}{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Следует заметить, что абсолютная среднеквадратическая погрешность Δt включает в себя, как минимум, две составляющие: аппаратную погрешность используемого в ГНС метода измерения времени распространения навигационного сигнала и погрешность траекторных расчетов при учете рефракционных искажений навигационного сигнала в зоне приведения. Кроме этого, следует также учитывать и погрешность, связанную с дифракционными искажениями навигационного сигнала на общей конструкции антенн конкретного СМ.

Количественная оценка погрешностей параметров ГНС с короткой базой

Для количественной оценки погрешностей навигационных параметров системы приведения следует конкретизировать ее некоторые характеристики:

- конфигурацию и базовые размеры разнесения приемных антенн СМ ГНС приведения;

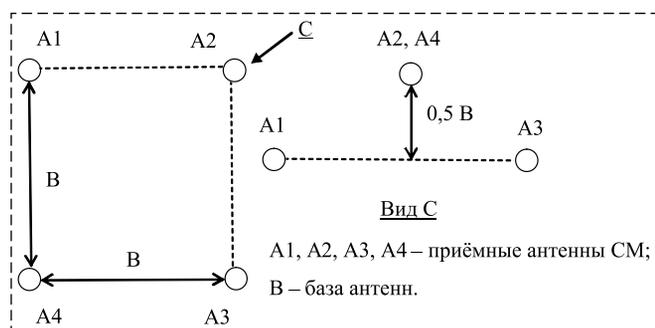
- размер зоны (области пространства) приведения ПА, ее возможные условные градации;
- пределы изменения инструментальных погрешностей в ГНС (погрешности оценки средневзвешенной по глубине скорости звука в зоне приведения, погрешности измерения времени распространения навигационного сигнала в предлагаемой структуре навигационной системы и погрешности определения пространственных координат приемных антенн СМ в процессе приведения).

При отсутствии информации о конкретной конфигурации и габаритных размерах СМ, стремясь к увеличению разрешающей способности ГНС при минимальном объеме пространства, занимаемого антеннами, на этапе предварительных расчетов выбираем такую конфигурацию СМ, при которой приемные антенны располагаются в вершинах квадрата (стороны квадрата определяют базу антенн В как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях), причем две диагональные антенны СМ смещены в плоскости, перпендикулярной направлению наблюдения на половину базы.

Указанную геометрию антенн иллюстрирует рис. 1. Данная геометрия позволяет, по предварительной оценке, обеспечить в ГНС приведения примерно одинаковую разрешающую способность навигационной системы по пространству приведения.

Вопросы, связанные с возможностью конкретного конструктивного исполнения антенн СМ предлагаемой геометрии, заслуживают самостоятельного обсуждения и здесь не рассматриваются.

База приемных антенн СМ при предварительных расчетах задается тремя значениями: 0,25, 0,5 и 1 м.



Расположение антенн стыковочного модуля гидроакустической навигационной системы
Antenna location of the docking module of the sonar navigation system

Зона приведения АПА относительно СМ при расчетах может быть разбита на три участка:

- дальняя зона (граница зоны — наклонное расстояние 300 м);
- средняя зона (граница зоны — наклонное расстояние 50 м);
- ближняя зона (граница зоны — наклонное расстояние 5 м).

Значения инструментальных погрешностей в ГНС приняты следующими:

- абсолютная погрешность оценки средневзвешенной по глубине скорости звука в зоне приведения (ΔC), согласно данным работы [20], — 0,5, 1, 2 м/с;
- составляющая аппаратной погрешности измерения времени распространения навигационного сигнала в четырехпозиционной ГНС ($\Delta \tau$), в соответствии с предварительными оценками аппаратной реализации, — 2, 5, 10 мкс;
- абсолютная погрешность определения пространственных координат приемных антенн СМ (Δx) на первом этапе расчетов (табл. 1—3) принимается равной нулю, а затем допол-

Таблица 1
Table 1

Погрешность оценки угловых координат и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС приведения АПА
The error in estimating the angular coordinates and the oblique distance in the four-position GNS of reducing the APA

Инструментальные погрешности		Среднеквадратическая погрешность (°)						
		Ближняя зона (5 м)		Средняя зона (50 м)		Дальняя зона (300 м)		
		min	max	min	max	min	max	
Угловые координаты								
База антенн 0,25 м								
$\Delta C = 1$ м/с	$\Delta \tau$, мкс	2	0,68	1,32	0,69	1,33	0,69	1,33
		5	1,7	3,31	1,72	3,33	1,72	3,33
		10	3,4	6,6	3,43	6,65	3,44	6,66
База антенн 1 м								
$\Delta C = 1$ м/с	$\Delta \tau$, мкс	2	0,17	0,33	0,17	0,34	0,17	0,34
		5	0,41	0,82	0,43	0,83	0,43	0,83
		10	0,83	1,64	0,86	1,66	0,86	1,66
Наклонное расстояние								
База антенн 0,25 м								
$\Delta C = 1$ м/с	$\Delta \tau$, мкс	2	0,08	0,12	0,85	1,2	5,1	7,2
		5	0,21	0,30	2,12	3,0	12,7	18,0
		10	0,42	0,59	4,25	5,99	25,4	36,0
База антенн 1 м								
$\Delta C = 1$ м/с	$\Delta \tau$, мкс	2	0,02	0,03	0,22	0,31	1,29	1,84
		5	0,05	0,07	0,53	0,75	3,19	4,5
		10	0,11	0,14	1,06	1,49	6,36	9,0

нительно исследуется ее влияние на общую погрешность оценки характеристик ГНС.

В табл. 1 приведены результаты расчетов абсолютных среднеквадратических погрешностей оценки угловых координат и наклонного расстояния до АПА, полученных на основе соотношений (9) и (10) для границ трех участков зоны приведения, и абсолютной среднеквадратической погрешности оценки средневзвешенной по глубине скорости распространения звука в зоне приведения $\Delta C = 1$ м/с при выбранных базах приемных антенн СМ. Здесь же представлены границы разброса (минимальное и максимальное значения) абсолютных среднеквадратических погрешностей оценки угловых координат и наклонного расстояния до АПА, которые имеют место при изменении его местоположения в заданной зоне (области пространства) приведения.

В табл. 2 помещены выборочные результаты расчетов, характеризующие влияние погрешности оценки средневзвешенной по глубине

скорости звука в дальней зоне приведения (наклонное расстояние 300 м) на погрешности оценки угловых координат АПА для диапазона изменений относительной среднеквадратической погрешности оценки средневзвешенной скорости звука от 0 до 10 %.

Табл. 3 содержит результаты расчетов средних по зоне приведения (среднее арифметическое минимальной и максимальной) погрешностей определения угловых координат АПА и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС:

- для диапазона наклонных расстояний зоны приведения от 1 до 300 м;
- базы антенн СМ 0,5 и 2 м;
- аппаратурной составляющей абсолютной среднеквадратической погрешности оценки времени распространения навигационного сигнала 5, 10, 20 мкс;
- абсолютной среднеквадратической погрешности оценки средневзвешенной по глубине скорости звука 2 м/с.

Таблица 2
Table 2

Влияние погрешности оценки скорости звука на точность определения угловых координат и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС приведения АПА

The effect of the error in estimating the speed of sound on the accuracy of determining the angular coordinates and the oblique distance in the four-position GNS of reducing the AAP

Зона приведения АПА	Погрешность оценки времени распространения навигационного сигнала	Максимальная среднеквадратическая погрешность (°)						
		Погрешность оценки скорости звука (%)						
		0	0,1	1	2	5	10	
Угловые координаты								
База антенн 0,25 м								
$R_0 = 300$ м	Δt , мкс	2	1,33	1,33	1,6	2,1	4,3	8,2
		5	3,33	3,33	3,4	3,7	5,2	8,8
		10	6,66	6,66	6,7	6,9	7,8	10,5
База антенн 1 м								
$R_0 = 300$ м	Δt , мкс	2	0,33	0,34	0,88	1,65	4,1	8,1
		5	0,83	0,84	1,16	1,81	4,13	8,14
		10	1,66	1,67	1,85	2,32	4,38	8,27
Наклонное расстояние								
База антенн 0,25 м								
$R_0 = 300$ м	Δt , мкс	2	7,2	7,2	9,37	14,0	30,9	60,4
		5	18,0	18,0	19,0	21,6	35,0	62,6
		10	36,0	36,0	36,5	37,9	47,0	70,0
База антенн 1 м								
$R_0 = 300$ м	Δt , мкс	2	1,8	1,9	6,3	12,1	30,0	60,0
		5	4,5	4,54	7,5	12,8	30,3	60,1
		10	9,0	9,0	10,8	15,0	31,3	60,6

Таблица 3
Table 3

Средняя по зоне приведения погрешность определения угловых координат и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС приведения АПА

The mean over the reduction zone is the error in determining the angular coordinates and the oblique distance in the four-position HPS of the APA reduction

Погрешность оценки времени распространения навигационного сигнала	Средняя среднеквадратическая погрешность (°)									
	Наклонное расстояние (м)									
	1	2	5	10	25	50	100	200	300	
Угловые координаты										
База антенн 0,5 м										
Δt , мкс	5	1,25	1,23	1,25	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
	10	2,49	2,46	2,49	2,50	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
	20	4,98	4,92	4,97	5,00	5,03	5,04	5,04	5,05	5,05
База антенн 2 м										
Δt , мкс	5	0,53	0,36	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	10	1,05	0,71	0,62	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	20	2,1	1,42	1,24	1,23	1,25	1,26	1,26	1,26	1,26
Наклонное расстояние										
База антенн 0,5 м										
Δt , мкс	5	0,025	0,05	0,13	0,26	0,64	1,28	2,57	5,14	7,71
	10	0,05	0,10	0,25	0,51	1,28	2,56	5,12	10,25	15,38
	20	0,10	0,20	0,50	1,00	2,55	5,11	10,24	20,49	30,74
База антенн 2 м										
Δt , мкс	5	0,011	0,015	0,032	0,065	0,166	0,335	0,672	1,35	2,02
	10	0,021	0,028	0,063	0,126	0,32	0,644	1,293	2,59	3,89
	20	0,042	0,057	0,124	0,25	0,633	1,275	2,56	5,13	7,7

Табл. 4 иллюстрирует влияние погрешности оценки координат приемных антенн СМ в дальней зоне (в условиях изменения его пространственной ориентации) на точность определения угловых координат в четырехпозиционной ГНС. В табл. 4 приведены результаты расчетов средних по зоне приведения погрешностей при максимальном влиянии (оценке сверху) погрешности оценки пространственных координат приемных антенн СМ. Погрешность оценки координат антенн СМ задана в процентах от базы антенн выбранной для расчетов геометрии.

В этой же таблице помещены выборочные результаты расчетов максимальной средней по зоне приведения среднеквадратической погрешности:

- для диапазона погрешности оценки координат антенн СМ от 0 до 10 %;
- базы антенн СМ 0,5 и 2 м;

Таблица 4
Table 4

Влияние погрешности оценки пространственных координат приемных антенн СМ на точность определения угловых координат и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС приведения АПА

The influence of the error in estimating the spatial coordinates of the receiving antennas of the SM on the accuracy of determining the angular coordinates and the oblique distance in the four-position HPS of bringing the APA

Зона приведения АПА	Погрешность оценки времени распространения навигационного сигнала	Максимальная средняя среднеквадратическая погрешность (°)						
		Погрешность оценки координат антенн (%)						
		0	0,5	1	2	5	10	
Угловые координаты								
База антенн 0,5 м								
$R_0 = 300$ м	$\Delta\tau$, мкс	5	1,26	1,33	1,52	2,1	4,39	8,5
		10	2,52	2,56	2,66	3,03	4,9	8,78
		20	5,05	5,06	5,12	5,32	6,6	9,81
База антенн 2 м								
$R_0 = 300$ м	$\Delta\tau$, мкс	5	0,32	0,53	0,9	1,71	4,21	8,41
		10	0,63	0,76	1,05	1,8	4,25	8,43
		20	1,26	1,33	1,52	2,1	4,39	8,5
Наклонное расстояние								
База антенн 0,5 м								
$R_0 = 300$ м	$\Delta\tau$, мкс	5	7,71	8,12	9,25	11,58	26,73	51,77
		10	15,37	15,58	16,2	18,47	29,86	53,45
		20	30,72	30,83	31,15	32,39	40,0	59,71
База антенн 2 м								
$R_0 = 300$ м	$\Delta\tau$, мкс	5	2,02	3,26	5,5	10,43	25,65	51,18
		10	3,89	4,65	6,42	10,94	25,87	51,29
		20	7,7	8,11	9,24	12,8	26,71	51,72

- аппаратурной составляющей абсолютной среднеквадратической погрешности оценки времени распространения навигационного сигнала 5, 10, 20 мкс;
- абсолютной среднеквадратической погрешности оценки средневзвешенной по глубине скорости звука 2 м/с.

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы:

- ▲ абсолютная среднеквадратическая погрешность оценки угловых координат ПА в четырехпозиционной ГНС приведения практически не зависит от наклонного расстояния до объекта в зоне приведения, что является достоинством системы при реализации процедуры привода;
- ▲ абсолютная среднеквадратическая погрешность оценки наклонного расстояния до АПА в ГНС приведения возрастает прямо пропорционально увеличению наклонного расстояния до объекта приведения (сохраняется постоянство относительной среднеквадратической погрешности оценки расстояния), что тоже не является ограничивающим фактором в процедуре привода;
- ▲ разрешающая способность ГНС по оценке угловых координат и наклонного расстояния объекта приведения возрастает пропорционально увеличению базы приемных антенн СМ и уменьшению погрешности оценки времени распространения навигационного сигнала в зоне приведения;
- ▲ если абсолютная среднеквадратическая погрешность оценки средневзвешенной по глубине скорости звука в зоне приведения не превышает 7,5 м/с (относительная погрешность не более 0,5 %), то ее влиянием на точность определения навигационных характеристик ГНС можно пренебречь ввиду малости указанной погрешности;
- ▲ для обеспечения в зоне приведения ГНС максимальной абсолютной среднеквадратической погрешности оценки угловых координат объекта приведения не более 1,7°, максимальной относительной среднеквадратической погрешности оценки наклонного расстояния до объекта не более 3 % (при погрешности измерения средневзвешенной скорости звука не более 2 м/с, а погрешности оценки времени распространения навигационного сигнала не более 10 мкс), база приемных антенн СМ должна быть не менее 1 м.

При реализации СМ с базой приемных антенн порядка 2 м и измерениях средневзвешенной по глубине скорости звука в зоне приведения с погрешностью не более 0,5 %, а времени распространения навигационного сигнала с погрешностью не более 10 мкс, четырехпозиционная ГНС приведения АПА позволяет обеспечить:

- среднюю по зоне приведения абсолютную среднеквадратическую погрешность оценки угловых координат объекта приведения не более 1°;
- среднюю по зоне приведения относительную среднеквадратическую погрешность оценки наклонного расстояния до АПА не более 2 %.

Влияние погрешности оценки пространственных координат приемных антенн СМ на погрешности определения угловых координат и наклонного расстояния в четырехпозиционной ГНС усиливается с увеличением базы антенн СМ и уменьшением погрешности оценки времени распространения навигационного сигнала в зоне приведения.

Требования по обеспечению точности определения координат приемных антенн СМ (точности пространственной ориентации СМ в процессе приведения АПА) для достижения высокой разрешающей способности четырехпозиционной ГНС следует признать достаточно жесткими.

В табл. 5 представлены значения относительной среднеквадратической погрешности Δx оценки пространственных координат приемных антенн СМ (в процентах от базы антенн), приводящие к удвоению максимальных средних по зоне приведения среднеквадрати-

Таблица 5
Table 5

Среднеквадратическая погрешность оценки пространственных координат приемных антенн СМ, снижающая вдвое разрешающую способность четырехпозиционной ГНС приведения АПА

RMS error in estimating the spatial coordinates of the receiving antennas of the SM, halving the resolution of the four-position GNS of driving the APA

Погрешность Δt , (мкс)	Погрешность Δx , %		
	База антенн 0,5 м	База антенн 1 м	База антенн 2 м
5	2,6	1,3	0,65
10	5,3	2,6	1,3
20	10,5	5,25	2,65

ческих погрешностей определения угловых координат и наклонного расстояния в ГНС, для ранее принятых в расчетах значений среднеквадратической погрешности Δt оценки времени распространения навигационного сигнала в зоне приведения и базы антенн СМ.

Задача обеспечения пространственной стабилизации СМ в водной среде с различными гидродинамическими характеристиками и требуемой точности определения его пространственной ориентации в процессе приведения является самостоятельной задачей, выходящей за рамки данной работы.

Заключение

Полученные количественные характеристики ГНС с короткой базой являются исходными показателями первого приближения при выборе необходимых параметров навигационного сигнала и разработке структуры аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы приведения, предназначенной для решения задачи автоматического приведения АПА к СМ заданного носителя.

В дальнейшем целесообразно уточнить полученные характеристики ГНС приведения с учетом:

- конкретной геометрии и габаритных размеров СМ;
- погрешности траекторных расчетов при учете рефракционных искажений навигационного сигнала в зоне приведения;
- дифракционных искажений навигационного сигнала на общей конструкции антенн конкретного СМ;
- погрешностей датчиков крена и дифференциала, задающих пространственную ориентацию СМ.

Список литературы

1. **Автоматические** подводные аппараты / М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Киселев и др. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.
2. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.** Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводного аппарата по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 4. С. 167–170.
3. **Киселев Л. В.** Организация пространственного движения автономного подводного аппарата при траекторном обследовании объектов, областей физических полей: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д. т. н., спец. 05.13.01. 1997.

4. **Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхманец Д. А.** Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука. 2005. 213 с.
5. **Кабанов Д. С.** Синтез алгоритма оптимального программно-позиционного управления многорежимным автоматическим подводным аппаратом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 60—66.
6. **Бобков В. А.** Навигация подводного робота по стереоизображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 17. 2016. № 2. С. 101—109.
7. **Henriksen L.** Real-time underwater object detection based on an electrically scanned highresolution sonar // In Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. 1994. pp. 99—104.
8. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е.** Новый метод контурного управления движением АНПА // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 46—56.
9. **Кушнерик А. А., Михайлов Д. Н., Сергиенко Н. С., Щербатюк А. Ф., Гой В. А., Туфанов И. Е., Дубровин Ф. С.** Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 67—72.
10. **DePasqua L.** Sonar navigation system and method. United States Patent 8879359. Date of publication 4.11. 2014.
11. **Филиппов Б. И., Чернецкий Г. А.** Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления в гидроакустических каналах связи // Известия ВолгГТУ, серия Электро-ника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 11. 2015. № 3(161). С. 69—72.
12. **Филиппов Б. И.** Протокол обмена сигналами в сети гидроакустических донных автономных станций // Известия ВолгГТУ, серия "Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь", вып. 12. 2015. № 11(176). С. 104—111.
13. **Филиппов Б. И.** Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестник РГРТУ. 2016. № 55. С. 33—40.
14. **Филиппов Б. И.** Передача телеметрической информации по гидроакустическому каналу связи // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 9. С. 658—663.
15. **Филиппов Б. И.** Алгоритм функционирования системы измерения дистанции с использованием гидроакустического канала связи // Вестник АГТУ, серия "Управление, вычислительная техника и информатика". 2016. № 4. С. 87—98.
16. **Филиппов Б. И., Чернецкий Г. А.** Принципы аппаратной реализации системы измерения дальности в гидроакустических каналах // Радиотехника. 2017. № 3. С. 40—49.
17. **Филиппов Б. И.** Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия "Управление, вычислительная техника и информатика". 2016. № 3. С. 81—91.
18. **Письменный Д. Т.** Лекции по высшей математике. М.: Айрис-пресс. 2002. 288 с.
19. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука 1974. 832 с.
20. **Мирский Г. Я.** Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1986. 440 с.

Architecture of a Hydroacoustic Navigation System with a Cotton Basis for Conversion of the Underwater Apparatus to the Docking Module

B. I. Filippov, Filippov-boris@rambler.ru

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, 630087, Russian Federation

Corresponding author: **Filippov Boris I.**, C. S. T., Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, 630087, Russian Federation, e-mail: Filippov-boris@rambler.ru

Accepted on 21 November, 2018

The object of the study are the principles and methods of hydroacoustic reduction of an autonomous underwater vehicle to a carrier. When solving the problem of constructing a hydroacoustic navigation system (HNS), the main systemic issues are the choice of an acceptable method for locating an object in the reduction zone and estimating the options of the proposed navigation system from the point of view of technical implementation. The feasibility of constructing the equipment of a high-frequency hydroacoustic reduction system in the form of a combined information and navigation antenna system combined in base, in which hydroacoustic navigation systems with a short base can be used, is justified; as navigation it is suggested to use data signals exchanged between the docking module and the autonomous underwater vehicle based on the results of measuring the mutual navigation options. The developed sample of equipment is part of a multifunctional network of hydroacoustic communication and should ensure that in a near zone at distances not exceeding 300 m, an autonomous underwater vehicle is brought into contact with the carrier. For this purpose, mutual determination of the distance and angular position of the docking module of the carrier and the autonomous underwater vehicle relative to each other is carried out. Determination of the distance and angular position of the docking module of the carrier and the autonomous underwater vehicle relative to each other is accompanied by the transfer of data between them along the hydroacoustic communication channel. The proposed sample of high-frequency hydroacoustic reduction system (HRS) equipment of short-range action is intended for operation as part of a complex of technical means providing underwater docking of an autonomous underwater vehicle with a carrier. The obtained quantitative options of short-based HNS are the initial indicators of the first approximation when selecting the necessary parameters of the navigation signal and developing the structure of the AGSS designed to solve the problem of automatically bringing the autonomous underwater vehicle (AUV) to the docking module (DM) of the given carrier.

Keywords: hydroacoustic navigation system, autonomous underwater vehicle, docking module, navigation options

For citation:

Filippov B. I. Architecture of a Hydroacoustic Navigation System with a Cotton Basis for Conversion of the Underwater Apparatus to the Docking Module, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 152—161.

DOI: 10.17587/mau.20.152-161

References

1. Ageev M. D., Kasatkin B. A., Kiselev L. V. et al. *Avtomaticheskie podvodnye apparaty* (Automatic underwater vehicles), Leningrad, Shipbuilding, 1981, 224 p. (in Russian).
2. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. *Sposob formirovaniya programmno upravleniya skorostnym rezhimom dvizheniya podvodnogo apparata po proizvol'nym prostranstvennym traektorijam s zadannoj dinamicheskoy tochnost'ju* (Method of software formation by the high-speed regime of underwater vehicle motion along an arbitrary spatial trajectory with a given dynamic accuracy), *Izvestiya RAN. Theory and control systems*, 2011, no. 4, pp. 167–170 (in Russian).
3. Kiselev L. V. *Organizatsiya prostranstvennogo dvizheniya avtonomnogo podvodnogo apparata pri traektornom obsledovanii ob'ektov, oblastej fizicheskikh polej* (Organization of the spatial use of an autonomous underwater vehicle in the trajectory survey of objects, areas of physical fields), *The thesis abstract for the degree of Doctor of Science*, special. 05.13.01, 1997 (in Russian).
4. Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhmanets D. A. *Ustrojstva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* (Devices and control systems for underwater robots), Moscow, Nauka, 2005, 213 p. (in Russian).
5. Kabanov D. S. *Sintez algoritma optimal'nogo programmno-pozitsionnogo upravleniya mnogorezhimnym avtomaticheskim podvodnym apparatom* (Synthesis of the algorithm of optimal program-positional control of a multimode automatic submersible vehicle), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 60–66 (in Russian).
6. Bobkov V. A. *Navigatsiya podvodnogo robota po stereoozbrazhenijam* (Navigation underwater robot on stereo images), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 101–109 (in Russian).
7. Henriksen L. Detection of an underwater object based on an electrically scanned high-resolution sonar, *In the materials of a symposium on autonomous technology of underwater transport*, 1994, pp. 99–104.
8. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Mursalimov E. Sh., Toufanov I. E. *Novyj metod konturnogo upravleniya dvizheniem ANPA* (New method of contour control by ANPA movement), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 46–56 (in Russian).
9. Kushnerik A. A., Mikhaylov D. N., Sergienko N. S., Shcherbatyuk A. F., Goy V. A., Toufanov I. E., Dubrovin F. S. *Morskoy robototekhnicheskij kompleks, vkluchajushhij avtonomnye ne-obitaemye podvodnyj i vodnyj apparaty* (The marine robot-technical complex, including autonomous uninhabited underwater and water vehicles), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 67–72 (in Russian).
10. Louis DePascua. The system and method of sonar, US Patent no. 8879359. Publication Date 4.11. 2014.
11. Filippov B. I., Chernetsky G. A. *Vybor ansamblja signalov dlja peredachi komand upravlenija v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi* (Selection of the ensemble of signals for command transmission in hydroacoustic communication channels), *Izvestiya VolgGTU, series Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications*, 2015, vol. 11, no. 3 (161), pp. 69–72 (in Russian).
12. Filippov B. I. *Protokol obmena signalami v seti gidroakusticheskikh donnykh avtonomnykh stancij* (Protocol for the exchange of signals in a network of hydroacoustic bottom autonomous stations), *Izvestiya VolgGTU, a series of electronics, measuring equipment, radio engineering and communications*, 2015, vol. 12, no. 11 (176), pp. 104–111 (in Russian).
13. Filippov B. I. *Opreделение naklonnoj dal'nosti mezhdu sudnom i donnoj stanciej* (Determination of the inclined distance between the court and the bottom station), *Vestnik RGRTU*, 2016, no. 55, pp. 33–40 (in Russian).
14. Filippov B. I. *Peredacha telemetricheskoy informacii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi* (Transmission of telemetric information on the hydroacoustic communication channel), *Informatsionnye tekhnologii*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 658–663 (in Russian).
15. Filippov B. I. *Algoritm funkcionirovaniya sistemy izmerenija distancii s ispol'zovaniem gidroakusticheskogo kanala svyazi* (Algorithm for the functioning of a distance system using a hydroacoustic communication channel), *Vestnik ASTU, Series Management, Computer Engineering and Informatics*, 2016, no. 4, pp. 87–98 (in Russian).
16. Filippov B. I., Chernetsky G. A. *Principy apparaturnoj realizacii sistemy izmerenija dal'nosti v gidroakusticheskikh kanalakh* (Principles of hardware implementation of distance measuring systems in hydroacoustic channels), *Radio engineering*, 2017, no. 3, pp. 40–49 (in Russian).
17. Filippov B. I. *Jenergeticheskij raschjot gidroakusticheskikh linij svyazi* (Energy calculation of hydroacoustic communication lines), *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 81–91 (in Russian).
18. Pissmenny D. T. *Lekcii po vysshej matematike* (Lectures on higher mathematics: 2nd ed.), Moscow, Iris press, 2002, 288 p. (in Russian).
19. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlja nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers), Moscow, Science, 1974, 832 p. (in Russian).
20. Mirsky G. Ya. *Jelektronnye izmerenija* (Electronic measurements), Recyc. and additional, Moscow, Radio and communication, 1986, 440 p. (in Russian).