

О МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАНС КБ

А.Ф. Щербатюк

В статье предложен экономичный способ решения задачи одновременного определения координат группы недорогих автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/. Полагается, что на борту каждого АНПА отсутствуют дорогостоящие системы точного времени и абсолютные датчики скорости. Представленный способ навигационного обеспечения группы АНПА основан на использовании гидроакустической навигационной системы с короткой базой /ГАНС КБ/. Рассмотрено исполнение ГАНС КБ, которое включает две приемные антенны на борту каждого АНПА и один излучающий маяк с известным местоположением. Для решения навигационной задачи используются измерения разности времени прихода сигнала в каждом такте на приемные антенны ГАНС КБ, разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну и измерения частоты принятого на борту АНПА сигнала. Описан алгоритм оценивания местоположения АНПА на основе фильтра частиц, предназначенный для работы на борту каждого АНПА в режиме реального времени. Представлены результаты работы предложенного алгоритма, полученные в процессе компьютерного моделирования, которые подтвердили его более высокую точность по сравнению с версией алгоритма, в которой измерения разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну не используются.

Ключевые слова: гидроакустическая навигация с короткой базой, групповая навигация, автономный необитаемый подводный аппарат.

1. Введение

В последние годы интенсивно разрабатываются методы, связанные с применением групп АНПА для решения широкого круга задач. АНПА все чаще применяются в задачах, связанных с поисковыми и наблюдательными миссиями. Примерами таких сценариев могут быть поисковые и инспекционные операции [1–3], миссии по охране акваторий [4, 5], отслеживание морских животных [6]. При выполнении экологического мониторинга водной среды возникают задачи локализации неоднородных областей в толще воды, оценивания запасов полей фитопланктона, обследования разливов нефти и других пространственных загрязнений [7].

Применение групп подводных аппаратов позволяет повысить эффективность выполнения подобных миссий по сравнению с использованием одиночного АНПА. В частности, использование таких групп обеспечивает более высокую надежность робототехнического комплекса в целом за счет введения неко-

торого уровня избыточности, позволяющей получать более качественные результаты и добиваться успешного решения поставленной задачи даже в случае возникновения аварийных ситуаций, например, выхода из строя одного или нескольких АНПА. В статье [8] рассмотрена задача организации эффективного сбора информации с сенсорных узлов автономной подводной сети на морском дне с помощью группы АНПА.

В связи с увеличением работ, в которых используются группы АНПА, актуальной становится задача уменьшения стоимости как самих АНПА, так и их навигационного обеспечения. При этом достижение требуемой точности навигации каждого АНПА из состава группы является одной из важнейших задач, определяющих успешность и качество выполнения подводных миссий. В настоящее время в большинстве случаев требуется знание координат АНПА с точностью не хуже 10 метров, а в отдельных случаях необходимо обеспечить субметровую точность при условии, что продолжительность работы подводно-

го аппарата может составлять несколько десятков часов. В работе [9] предложен экономичный метод групповой навигации АНПА при обслуживании сети донных сенсорных узлов, позволяющий обойтись без использования штатных гидроакустических маяков и дорогостоящих опорных подводных аппаратов, оснащенных высокоточными навигационными системами.

В представленной статье предложен экономичный способ решения задачи одновременного определения координат группы недорогих АНПА, основанный на использовании гидроакустической навигационной системы с короткой базой. Рассмотрен вариант исполнения ГАНС КБ, который включает отдельный маяк, периодически излучающий акустический сигнал, и две приемные антенны на борту каждого АНПА. Для решения навигационной задачи используются измерения разности времени прихода сигнала в каждом такте на приемные антенны ГАНС КБ, разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну и измерения частоты принятого на борту АНПА сигнала. Описан алгоритм оценивания местоположения АНПА на основе фильтра частиц. Использование измерений разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну позволяет повысить точность позиционирования АНПА по сравнению с навигационной системой, описанной в [10], в которой эти данные не используются.

В части 2 статьи рассмотрена постановка задачи навигационного обеспечения группы АНПА с использованием гидроакустической навигационной системы с короткой базой. Алгоритм одновременного определения местоположения всех АНПА из группы на основе модели их движения и использования информации от ГАНС КБ, рассмотрен в части 3. Описание результатов компьютерного моделирования работы предложенного алгоритма позиционирования АНПА приведено в части 4.

2. Задача обеспечения навигации группы АНПА с использованием ГАНС КБ

Рассмотрим оценивание местоположения произвольного АНПА из группы в неподвижной системе координат, связанной с наземным пунктом управления, в которой оси Ox , Oy и Oz направлены соответственно на север, восток и вертикально вниз. Положим, что траектория АНПА лежит в горизонтальной плоскости и состоит из прямолинейных галсов, при выполнении которых подводный аппарат движется

постоянным курсом с фиксированной скоростью на заданной глубине. Такой способ формирования траектории используется при решении большинства практических задач, связанных с обследованием указанных областей или инспектированием подводных технических сооружений, таких как подводные добычные комплексы /ПДК/. Без ограничения общности можно полагать, что маяк находится в заданной точке с координатами (x_a, y_a, z_a) . Положим, что на каждом АНПА отсутствуют система точного времени и абсолютный датчик скорости, но известен период τ излучения навигационных сигналов маяком. В связи с отсутствием системы точного времени часы АНПА и маяка рассинхронизированы и отсутствует возможность измерить с требуемой точностью время распространения акустического сигнала от маяка до антенн АНПА.

Задача обеспечения навигации группы АНПА заключается в одновременном определении местоположения с требуемой точностью каждого АНПА из группы [11]. Оцениваемый вектор состояния каждого АНПА включает его горизонтальные координаты (x, y) . Положим, что в начальный момент времени местоположение АНПА равновероятно находится в любой точке квадратной области со стороной d_{xy} .

Бортовая навигационная система обеспечивает измерение курса $\tilde{K}_k$:

$$\tilde{K}_k = K_k + K_{\xi k}, \quad (1)$$

где K_k – истинные значения курса, $K_{\xi k}$ – центрированные ошибки в виде белого шума.

Для решения указанной задачи используется информация от ГАНС КБ, которая включает отдельный маяк, местоположение которого известно. Полагается, что маяк установлен примерно на той же глубине, на которой работает АНПА. При выполнении глубоководных обзорно-поисковых операций во многих случаях маяк выставляется на глубине работы АНПА для уменьшения ошибок, связанных с распространением звука в вертикальной плоскости. Аналогичная ситуация и при инспектировании ПДК, где имеется штатный маяк, который включается по сигналу при работе АНПА. Две приемные антенны ГАНС КБ на борту каждого АНПА расположены вдоль его корпуса и фиксируют моменты (t_1, t_2) приема сигналов от маяка в каждом такте работы ГАНС КБ. Интервал времени $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ пропорционален разности расстояний между приемными антеннами и маяком. Предполагается, что блок обработки принятых акустических сигналов на АНПА обеспечивает измерение частоты принятого сигнала $\tilde{f}_k$:

$$\tilde{f}_k = f_k + \xi_{fk}, \quad (2)$$

где f_k – истинные значения частоты принятого сигнала, ξ_{fk} – центрированные ошибки в виде белого шума.

В соответствии с уравнением Доплера имеем:

$$f_k = (1 + (v_k/c) \cdot \cos \theta_k) \cdot f_s \quad (3)$$

где f_s – известная частота сигнала источника, v_k – скорость приемника и θ_k – относительный пеленг на источник сигнала (маяк), c – скорость распространения звукового сигнала в воде. Полагалось, что она рассчитывалась на АНПА с учетом информации от бортовых датчиков температуры, солености и давления с необходимой точностью. Знак плюс в выражении (3) выбран в предположении, что АНПА движется по направлению к маяку. В соответствии с [12], относительный пеленг θ_k на маяк связан со значением базового расстояния a между приемными антеннами ГАНС КБ на АНПА в k -ом такте соотношением:

$$\theta_k = \arccos(c \cdot \Delta t_{12k}/a). \quad (4)$$

Используя выражения (3) и (4), можно получить соотношение для скорости v_k :

$$v_k = (a/\Delta t_{12k})((f_k/f_s) - 1). \quad (5)$$

Следуя принципу распределения информации [13, 14] и используя измерения курса $\tilde{R}_k$ и частоты принятого сигнала $\tilde{f}_k$ в качестве входного сигнала в уравнениях для истинных координат отдельного подводного аппарата на k -ом такте работ, можно следующим образом записать уравнения для его вектора состояния:

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \cos(\tilde{R}_k) + \xi_x, \\ y_k &= y_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \sin(\tilde{R}_k) + \xi_y, \end{aligned} \quad (6)$$

где (ξ_x, ξ_y) – ошибки из-за неточных измерений курса и частоты. При малых $K_{\xi k}$ и ξ_{fk} , с учетом

$$\begin{aligned} \cos(K_k) &\approx \cos(\tilde{R}_k) + \sin(\tilde{R}_k) \cdot K_{\xi k}, \\ \sin(K_k) &\approx \sin(\tilde{R}_k) - \cos(\tilde{R}_k) \cdot K_{\xi k} \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} \xi_x &= \tau \left[\tilde{v}_k \sin(\tilde{R}_k) K_{\xi k} + \left(\frac{\cos(\tilde{R}_k)a}{(f_s \Delta \tilde{t}_{12k})} \right) \times \left(\frac{\xi_{t1k}(\tilde{f}_k - f_s)}{\Delta \tilde{t}_{12k}} + \xi_{fk} \right) \right] \\ \xi_y &= \tau \left[-\tilde{v}_k \cos(\tilde{R}_k) K_{\xi k} + \left(\frac{\sin(\tilde{R}_k)a}{(f_s \Delta \tilde{t}_{12k})} \right) \left(\frac{\xi_{t1k}(\tilde{f}_k - f_s)}{\Delta \tilde{t}_{12k}} + \xi_{fk} \right) \right], \end{aligned}$$

где

$$\tilde{v}_k = (a/\Delta \tilde{t}_{12k})((\tilde{f}_k/f_s) - 1). \quad (7)$$

При оценке вектора состояния АНПА также используются измерения разности времен распространения сигнала на две приемные антенны АНПА в текущем такте ГАНС КБ $\Delta \tilde{t}_{12k}$ и разности времени

прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну $\Delta \tilde{t}_{k,k-1}$.

Допустим в k -ом такте работы имеются измерения времен прихода сигналов на первую и вторую антенны на АНПА $\tilde{t}_{1k}$ и $\tilde{t}_{2k}$:

$$\tilde{t}_{1k} = t_{1k} + \xi_{1k}, \tilde{t}_{2k} = t_{2k} + \xi_{2k},$$

в $k-1$ -ом такте работы системы имеется измерение $\tilde{t}_{1k-1}$:

$$\tilde{t}_{1k-1} = t_{1k-1} + \xi_{1k-1},$$

где ξ_{1k}, ξ_{2k} и ξ_{1k-1} – независимые центрированные случайные величины в виде белого шума с дисперсией σ^2 .

Для измерения $\Delta \tilde{t}_{12k}$ разности прихода сигнала в одном такте на разные антенны имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{t}_{12k} &= \Delta t_{12k} - \xi_{12k}, \\ \xi_{12k} &= \xi_{1k} - \xi_{2k}, \end{aligned} \quad (8)$$

где Δt_{12k} – истинные значения разности времен, ξ_{12k} – центрированная случайная величина в виде белого шума с дисперсией $\sigma_1^2 = 2\sigma^2$.

Для истинных значений разности времен имеем:

$$\begin{aligned} \Delta t_{12k} &= h_1(x_k, y_k, K_k) = (D_{a2k} - D_{a1k})/c, \\ D_{a2k} &= \sqrt{(x_a - x_{a2k})^2 + (y_a - y_{a2k})^2 + (z_a - z)^2}, \\ D_{a1k} &= \sqrt{(x_a - x_{a1k})^2 + (y_a - y_{a1k})^2 + (z_a - z)^2}, \\ x_{a2k} &= x_k + a \cdot \cos(K_k)/2, \\ y_{a2k} &= y_k + a \cdot \sin(K_k)/2, \\ x_{a1k} &= x_k - a \cdot \cos(K_k)/2, \\ y_{a1k} &= y_k - a \cdot \sin(K_k)/2, \end{aligned} \quad (9)$$

где (x_k, y_k) – истинные координаты АНПА, (x_{a1k}, y_{a1k}) , (x_{a2k}, y_{a2k}) – истинные координаты первой и второй антенн АНПА.

Выразим $\Delta \tilde{t}_{12k}$ через измеренное значение курса $\tilde{R}_k$. С учетом только членов первого порядка малости получим:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{t}_{12k} &= h_1(x_k, y_k, \tilde{R}_k - K_{\xi k}) + \xi_{12k} \approx \\ &\approx h_1(x_k, y_k, \tilde{R}_k) + \xi_{12k} - g_1(x_k, y_k, \tilde{R}_k) \cdot K_{\xi k}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} g_1(x_k, y_k, \tilde{R}_k) &= \\ &= \frac{a}{2c} [((x_a - \tilde{x}_{a2k}) \sin \tilde{R}_k - (y_a - \tilde{y}_{a2k}) \cos \tilde{R}_k)/\tilde{D}_{a2k} + \\ &\quad + ((x_a - \tilde{x}_{a1k}) \sin \tilde{R}_k - (y_a - \tilde{y}_{a1k}) \cos \tilde{R}_k)/\tilde{D}_{a1k}], \end{aligned}$$

$\tilde{D}_{a2k}, \tilde{D}_{a1k}, \tilde{x}_{a2k}, \tilde{y}_{a2k}, \tilde{x}_{a1k}, \tilde{y}_{a1k}$ – дальности от маяка до антенн на АНПА и координаты антенн, полученные на основе измеренных значений курса $\tilde{R}_k$. Следует отметить, что в (10) слагаемое $g_1(x_k, y_k, \tilde{R}_k) \cdot K_{\xi k}$ приобретает мультипликативный характер из-за

зависимости от оцениваемых координат АНПА.

Для измерения $\Delta \tilde{t}_{k-1,k}$ разности прихода сигнала в последовательных тактах на одну антенну имеем:

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{t}_{k-1,k} &= \Delta t_{k-1,k} + \xi_{k-1,k}, \\ \xi_{k-1,k} &= \xi_{1k} - \xi_{1k-1},\end{aligned}\quad (11)$$

где $\Delta t_{k-1,k}$ – истинные значения разности времен, $\xi_{k-1,k}$ – центрированная случайная величина в виде белого шума с дисперсией $\sigma_{\xi}^2 = 2\sigma^2$.

Для истинных значений разности времен имеем:

$$\begin{aligned}t_k &= t_k^s + D_{a1k}/c, \quad t_{k-1} = t_{k-1}^s + D_{a1k-1}/c, \\ t_k^s - t_{k-1}^s &= \tau,\end{aligned}$$

где t_k^s и t_k – моменты времени излучения и приема сигнала в k -ом такте, t_{k-1}^s и t_{k-1} – моменты времени излучения и приема ($k-1$)-ом такте, откуда вычитанием получаем:

$$\begin{aligned}\Delta t_{k-1,k} &= h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, K_k, K_{k-1}) = \\ &= (D_{a1k} - D_{a1k-1})/c + \tau, \\ D_{a1k-1} &= \\ &= \sqrt{(x_a - x_{a1k-1})^2 + (y_a - y_{a1k-1})^2 + (z_a - z)^2}, \\ x_{a1k-1} &= x_{k-1} - a \cdot \cos(K_{k-1})/2, \\ y_{a1k-1} &= y_{k-1} - a \cdot \sin(K_{k-1})/2,\end{aligned}\quad (12)$$

где (x_{k-1}, y_{k-1}) – истинные координаты АНПА и (x_{a1k-1}, y_{a1k-1}) – истинные координаты первой антенны АНПА на $(k-1)$ -ом такте работы ГАНС КБ.

Выразим $\Delta \tilde{t}_{k,k-1}$ через измеренные значения курса $\tilde{K}_k$ и $\tilde{K}_{k-1}$. С учетом только членов первого порядка малости, получим:

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{t}_{k,k-1} &= \\ &= h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_k - K_{\xi k}, \tilde{K}_{k-1} - K_{\xi k-1}) + \\ &+ \xi_{k-1,k} \approx h_2(x_k, y_k, x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_k, \tilde{K}_{k-1}) + \xi_{k-1,k} - \\ &- g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k} - g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) \cdot K_{\xi k-1},\end{aligned}\quad (13)$$

где

$$\begin{aligned}g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) &= \\ &= \frac{a}{2c} ((x_a - x_{a1k}) \sin \tilde{K}_k - (y_a - y_{a1k}) \cos \tilde{K}_k) / \tilde{D}_{a1k}, \\ g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) &= \frac{a}{2c} ((x_a - x_{a1k-1}) \sin \tilde{K}_{k-1} - \\ &- (y_a - y_{a1k-1}) \cos \tilde{K}_{k-1}) / \tilde{D}_{a1k-1},\end{aligned}$$

$\tilde{D}_{a1k-1}$, $\tilde{x}_{a1k-1}$, $\tilde{y}_{a1k-1}$ – дальности от маяка до антенн на АНПА и координаты антенн, полученные на $(k-1)$ -ом такте работы ГАНС КБ на основе измеренных значений курса $\tilde{K}_{k-1}$. Следует отметить, что в (13) слагаемые $g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}$

и $g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1}) \cdot K_{\xi k-1}$ также приобретают мультипликативный характер из-за зависимости от оцениваемых координат АНПА.

Таким образом, задачу оценивания местоположения каждого АНПА будем рассматривать как задачу фильтрации вектора состояния (6) по измерениям (1), (2), (8) и (11) при описанных выше свойствах ошибок $\xi_{k-1,k}$, ξ_{12k} , $K_{\xi k}$ и ξ_{fk} . Случайные величины $\xi_{k-1,k}$ и ξ_{12k} коррелированные с ковариационным моментом $E[(\xi_{1k} - \xi_{2k})(\xi_{1k} - \xi_{1k-1})] = E(\xi_{1k} \xi_{1k}) = \sigma^2$.

При этом априорная вероятности оцениваемого вектора состояния в начальный момент времени описывается равномерной функцией в любой точке квадратной области со стороной d_{xy} . На рис. 1 показаны последовательные положения АНПА на $k-1$ -ом и k -ом тактах работы ГАНС КБ.

3. Алгоритм одновременного оценивания местоположений АНПА в группе на основе данных от ГАНС КБ

В соответствии с постановкой задачи, приведенной в части 2, оцениваемые параметры связаны с измеряемыми величинами нелинейными уравнениями, и функция распределения ошибок (ξ_x, ξ_y) отличается от гауссовского распределения. Для решения указанной задачи, заключающейся в одновременном оценивании местоположения каждого АНПА из группы при наличии описанных ошибок в измерениях, используем алгоритм на основе фильтра частиц /ФЧ/, который работоспособен в нелинейных и негауссовских средах.

Рассмотрим оценивание местоположения произвольного АНПА из группы. Сформируем облако из N частиц, равномерно распределенных в 2-мерном пространстве (x, y) , где x и y – координаты АНПА в горизонтальной плоскости. Нормированные веса для всех частиц в начальный момент времени принимаются одинаковыми и равными $\omega^i = 1/N$, где i – номер частицы. Каждая частица представляет собой возможное местоположение АНПА в соответствии с уравнением (6).

На этапе экстраполяции работы ФЧ выполняется расчет предсказываемого местоположения $(\tilde{x}_k^e, \tilde{y}_k^e)$ в k -ом такте работы ГАНС КБ. При этом используются полученные на предыдущем шаге оценки $(\hat{x}_{k-1}^p, \hat{y}_{k-1}^p)$, а также предполагаемое перемещение АНПА:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_k^e &= \hat{x}_{k-1}^p + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \cos(\tilde{K}_k), \\ \tilde{y}_k^e &= \hat{y}_{k-1}^p + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \sin(\tilde{K}_k),\end{aligned}$$

где $\tilde{v}_k$ – оценка скорости в соответствии с (7), а $\tilde{K}$ – измерение курса движения АНПА.

На этапе коррекции работы фильтра частиц на k -ом такте работы ГАНС КБ уточняются веса частиц на основе рассогласования измеренной разности $\Delta \tilde{t}_{12k}$ времени прихода сигналов на первый и второй приемники ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов Δt_{12k}^i , вычисленной согласно (9) при $x_k = x_k^i, y_k = y_k^i$, для всех частиц с использованием измеренного курса $\tilde{K}_k$, а также рассогласования измеренной разности $\Delta \tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t_{k,k-1}^i$, вычисленной согласно (12) при $x_k = x_k^i, y_k = y_k^i$ и $x_{k-1} = x_{k-1}^i, y_{k-1} = y_{k-1}^i$ для всех частиц с использованием измеренных курсов $\tilde{K}_k$ и $\tilde{K}_{k-1}$.

При этом коррекция ненормированных весов частиц выполняется с помощью функции правдоподобия, соответствующей приведенной выше модели для измерений:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_k^i &= (\tilde{\omega}_{k-1}^i / \sqrt{\det D_{i,k,k-1}}) \times \\ &\times \exp(-0.5(\Delta \tilde{t}_{12k} - \Delta t_{12k}^i)^T \times \\ &\times D_{i,k,k-1}^{-1}(\Delta \tilde{t}_{k,k-1} - \Delta t_{k,k-1}^i)), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\tilde{\omega}_k^i$ – ненормированный вес частицы, $D_{i,k,k-1}$ – ковариационная матрица, которая имеет вид:

$$D_{i,k,k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{i,12k}^2 & \sigma_{i,12,k,k-1}^2 \\ \sigma_{i,12,k,k-1}^2 & \sigma_{i,k,k-1}^2 \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{i,12k}^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_{i,g1}^2 = 2\sigma^2 + \sigma_{i,g1}^2, \sigma_{i,k,k-1}^2 = \\ &= \sigma_2^2 + \sigma_{i,g21}^2 + \sigma_{i,g22}^2 = 2\sigma^2 + \sigma_{i,g21}^2 + \sigma_{i,g22}^2, \\ \sigma_{i,12,k,k-1}^2 &= \sigma^2 + g_1(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \times \\ &\times [g_{21}(x_k, y_k, \tilde{K}_k) + g_{22}(x_{k-1}, y_{k-1}, \tilde{K}_{k-1})] \sigma_K^2, \end{aligned}$$

где σ_K^2 – дисперсия ошибки измерения курса. После вычисления весов всех частиц согласно (14) их веса нормируются.

Для повышения эффективности работы фильтра частиц применяется процедура перевыборки [15], связанная с тем, что в процессе его работы лишь небольшое число частиц будет иметь существенные, отличные от нуля веса. Эта процедура выполняется

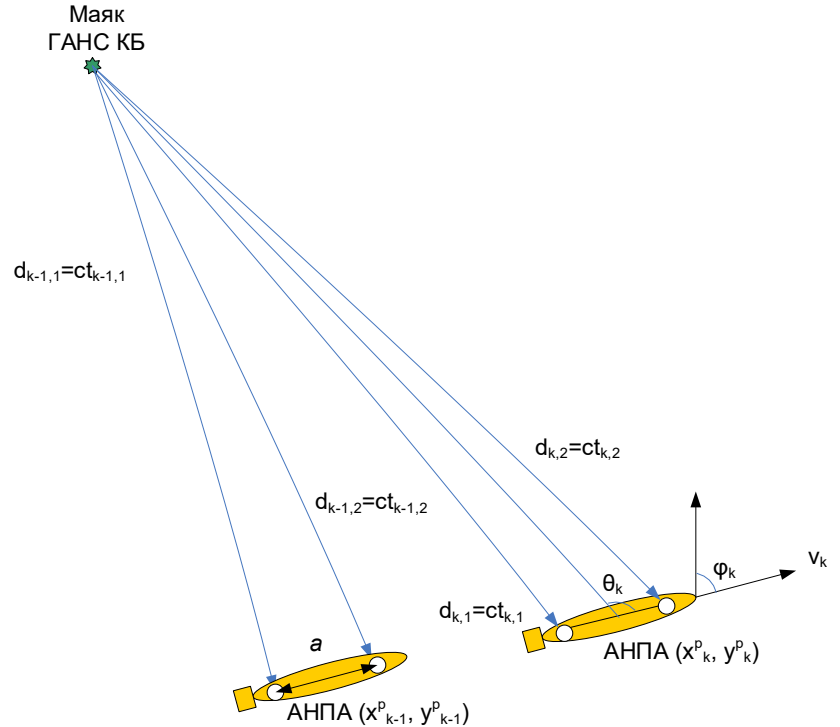


Рис. 1. Последовательные положения АНПА на $k-1$ -ом и k -ом тактах работы ГАНС КБ

аналогично тому, как это описано в [10]. В качестве оценки местоположения $(\hat{x}_{ik}^p, \hat{y}_{ik}^p)$ для i -го АНПА из группы на k -м шаге работы ГАНС КБ используется взвешенное значение координат для всех частиц.

4. Некоторые результаты моделирования работы навигационного алгоритма на основе данных ГАНС КБ

С целью исследования работоспособности навигационного алгоритма определения местоположения АНПА были выполнены численные эксперименты. Для компьютерного моделирования использовалась среда IDLE (Python). При этом были приняты следующие параметры: период работы ГАНС КБ – 10 секунд, расстояние между приемными антеннами на АНПА – 2 метра, скорость распространения звукового сигнала в воде – 1500 м/с. Полагалось, что скорость течения в районе работ отсутствует. Начальная область неопределенности местоположения АНПА представляла собой квадрат со стороной 100 м. Предполагалось равновероятное нахождение АНПА в любой точке указанного квадрата.

В процессе модельных экспериментов использовалось облако из 8000 частиц. При этом каждый эксперимент выполнялся с использованием метода Монте-Карло и заключался в выполнении по 100 раз

моделирования с одинаковыми заданными параметрами и разными случайными ошибками. На основе полученных результатов рассчитывались среднее значение и дисперсия ошибок оценивания местоположения АНПА.

На рис. 2 показана расчетная траектория движения АНПА в течении 150 тактов работы ГАНС КБ, которая была получена в одном из экспериментов. АНПА стартовал из точки с координатами (-3000, -2000) м. Маяк был расположен в точке с координатами (0, 0) м. Параметры движения АНПА в горизонтальной плоскости: скорость 1 м/с, курс 45 град. Пройденный путь составил около 1500 м и время в пути – около 25 мин.

При моделировании на первом такте работы ГАНС КБ для уточнения весов частиц использовались только рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{121}$ времени прихода сигналов на первую и вторую приемные антенны ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов Δt_{121}^i , вычисленной согласно (9) при $x_1 = x_1^i, y_1 = y_1^i$ для всех частиц с использованием измеренного курса $\bar{R}_1$. В последующих тактах работы ГАНС КБ для уточнения весов частиц также использовались рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t_{k,k-1}^i$, вычисленной согласно (12) при $x_k = x_k^i, y_k = y_k^i$ и $x_{k-1} = x_{k-1}^i, y_{k-1} = y_{k-1}^i$ для всех частиц с использованием измеренных курсов $\bar{R}_k$ и $\bar{R}_{k-1}$.

Результирующие ошибки оценивания координат формировались посредством вычисления расстояния в одинаковые моменты времени между положениями АНПА при безошибочных измерениях и положениями АНПА, когда измерения курса и разности времен прихода сигналов содержали указанные в данном разделе ошибки.

На первом этапе модельных экспериментов было выполнено сопоставление точности оценивания местоположения АНПА в случае использования для уточнения весов частиц рассогласования измеренной разности $\Delta\tilde{t}_{k,k-1}$ времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигналов $\Delta t_{k,k-1}^i$, вычисленной согласно (12) только с ним и без его использования.

Во всех модельных экспериментах полагалось, что измерения времен прихода сигналов содержат случайные центрированные и независимые ошибки в виде белого шума в соответствии с моделью, представленной в части 2. Измерения курса АНПА и ча-

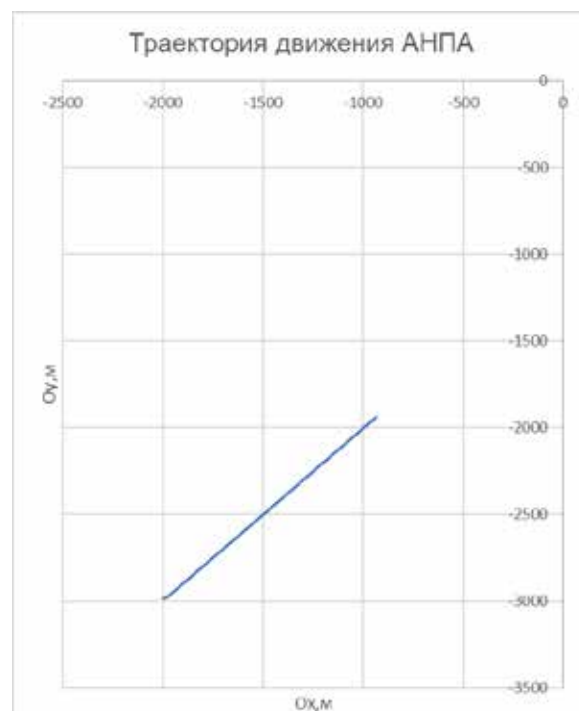


Рис. 2. Траектория АНПА, полученная с использованием указанных параметров его движения (маяк расположен в начале координат)

стоты принятого сигнала также включали случайные центрированные и независимые ошибки в виде белого шума. Полагалось, что случайные ошибки в измерениях частоты находились в диапазоне $(-0,01*f_s, 0,01*f_s)$, а случайные ошибки в измерениях курса – в диапазоне $(-0,1, 0,1)$ град.

В случае, когда случайные ошибки в измерениях разности времен прихода сигналов соответствовали ГАНС средней точности и лежали в диапазоне $(-0,3*10^{-4}, 0,3*10^{-4})$ секунд, для ситуации с использованием рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и рассогласования измеренной и вычисленной разности прихода сигналов в одном такте на разные антенны, среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 1,35 м, среднеквадратическое отклонение – 0,87 м. При использовании только рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 4,43 м, среднеквадратическое отклонение – 1,33 м. При использовании только рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны среднее зна-



Рис. 3. Ошибки оценивания местоположения АНПА: серая кривая – при использовании рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах ГАНС КБ на одну антенну, оранжевая кривая – при использовании аналогичного рассогласования в одном такте на разные антенны, синяя кривая – при одновременном использовании двух указанных выше рассогласований, полученные при одинаковых уровнях ошибок измерений курса и времени прихода сигнала на антенны АНПА

чение ошибки определения местоположения АНПА составило 9,09 м, среднеквадратическое отклонение – 6,21 м. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА позволяет существенно повысить точность оценивания местоположения АНПА. Ошибки оценивания местоположения в течении работы НС с использованием описанного алгоритма, полученные при выполнении одного из указанных модельных экспериментов, показаны на рис. 3.

Полученный результат имеет физическое объяснений - точность акустической навигации повышается с увеличением размера базы – расстояния между приемными элементами. В рамках одного такта это расстояние соответствует расстоянию между приемными антеннами на корпусе АНПА – в данном случае 2 м. При использовании измерений между так-

тами это расстояние равно пути, который антенна проходит за период работы ГАНС в данном случае он равен: $10 \text{ с} * 1 \text{ м/с} = 10 \text{ м}$.

Затем были выполнены модельные эксперименты с целью исследования зависимости точности позиционирования АНПА при увеличении уровня ошибок измерения курса и разности времени прихода сигнала на антенны ГАНС КБ на АНПА, когда для уточнения весов частиц использовались рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну ГАНС КБ на АНПА и измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны. В случае, когда случайные ошибки в измерениях разности времен прихода сигналов лежали в диапазоне $(-10^{-3}, 10^{-3})$ секунд, а случайные ошибки в измерениях курса – в диапазоне $(-1, 1)$ градусов, среднее значение ошибки определения местоположения АНПА составило 3,35 м, среднеквадратическое отклонение – 2,17 м.



Рис. 4. Ошибки оценивания местоположения АНПА: синяя кривая – при ошибках в измерениях разности времен прихода сигналов, лежащих в диапазоне $(-0,3*10^{-4}, 0,3*10^{-4})$ секунд и ошибках измерения курса - в диапазоне $(-0,1, 0,1)$ градусов, оранжевая кривая – при ошибках в измерениях разности времен прихода сигналов, лежащих в диапазоне $(-10^{-3}, 10^{-3})$ секунд и ошибках измерения курса – в диапазоне $(-1, 1)$ градусов

Полученный результат свидетельствует о работоспособности алгоритма, использующего для уточнения весов частиц рассогласования измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в двух последовательных тактах на одну приемную антенну на АНПА и измеренной и вычисленной разности времени прихода сигналов в одном такте на разные антенны, и в случае высокого уровня ошибок, соответствующих низкоточным ГАНС. На рис. 4 приведены ошибки оценивания местоположения, полу-

ченные в ходе одного из модельных экспериментов с указанными параметрами.

Исследование выполнено за счет государственного задания ИАПУ ДВО РАН (разработка усовершенствованного алгоритма групповой навигации АНПА на основе ГАНС КБ) и гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/> (моделирование работы алгоритма на основе фильтра частиц).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferri G. et al. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, no. 12. P. 1740–1761.
2. Gabriele Ferri, Raffaele Grasso et al. A Hybrid Robotic Network for Maritime Situational Awareness // Results from the INFORE22 Sea Trial. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton, USA.
3. Kim, S.-M. et al. Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents // Proceedings of the OCEANS 2024 MTS/IEEE Conference, Halifax, USA.
4. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection // Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton Roads, USA.
5. Павин А.М., Щербатюк А.Ф. О поиске источников шума группой взаимодействующих АНПА с применением генетического алгоритма // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 2 (48). С. 26–37.
6. Lin Y. et al. A Multi Autonomous Underwater Vehicle System for Autonomous Tracking of Marine Life // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34, no. 4. P. 757–774.
7. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.F. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, no. 5. P. 885–896.
8. Thompson J. et al. Multi-AUV Placement for Coverage Maximization in Underwater Optical Wireless Sensor Networks // Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS 2020 MTS/IEEE. San-Diego, USA.
9. Щербатюк А.Ф. О методе навигации группы АНПА без использования гидроакустических маяков // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 4 С. 106–121. DOI 10.17285/0869-7035.00106
10. Щербатюк А.Ф. Об экономичном способе обеспечения навигации недорогих АНПА с использованием ГАНС с короткой базой // Гироскопия и навигация. 2025. № 4.
11. Atwood D.K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles // Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. September, 1995. P. 202–208.
12. Бородин В., Смирнов Г., Толстякова Н. и др. Гидроакустические навигационные средства. Л.: Судостроение, 1983, 263 с.
13. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 448 с.
14. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ - ЦНИИ «Электронприбор», 1998. 370 с.
15. Васильев В.А., Исаев А.М., Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы Монте-Карло в задачах обработки измерительной информации с использованием процедур перевыборки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2026. № 1.

Сведения об авторе

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5

Научные интересы: разработка и использование морских робототехнических комплексов, навигационное обеспечение необитаемых подводных аппаратов

Тел. +7(902)52-38-156. E-mail: alex-scherba@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Щербатюк А.Ф. О МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАНС КБ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 50–58. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_06. EDN: GEEWUG.



ABOUT METHOD OF INCREASING THE ACCURACY FOR AUVS GROUP POSITIONING USING ACOUSTICAL NAVIGATION SYSTEM WITH SHORT BASE LINE

A.F. Scherbatyuk

The paper proposes a cost-effective solution for simultaneously determining the coordinates for a group of inexpensive autonomous underwater vehicles (AUVs). It is assumed that each AUV lacks expensive precision time system and absolute velocity log. The presented method for providing navigation support for a group of AUVs is based on the use of a short-baseline acoustic navigation system (SB ANS). SB ANS implementation is considered, which includes two receiving antennas on board each AUV and one emitting beacon with a known location. To solve the navigation problem, measurements are made of the difference in signal arrival times in each cycle at the SB ANS receiving antennas, the difference in signal arrival times in two consecutive cycles at a single receiving antenna, and measurements of the frequency for the signal received on board the AUV. An algorithm for estimating the AUV's position based on a particle filter is described, designed for operation on board each AUV in real time. The results of the proposed algorithm computer simulation are presented, which confirmed its higher accuracy compared to the version of the algorithm in which measurements of the difference in the arrival time of signals in two consecutive clock cycles to one receiving antenna are not used.

Keywords: short-baseline acoustical navigation, group navigation, autonomous underwater vehicle.

References

1. Ferri G. et al. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, No. 12. P. 1740–1761.
2. Gabriele Ferri, Raffaele Grasso et al. A Hybrid Robotic Network for Maritime Situational Awareness: Results from the INFORE22 Sea Trial. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton, USA.
3. Kim, S.-M. et al. Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents. Proceedings of the OCEANS 2024 MTS/IEEE Conference, Halifax, USA.
4. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference, Hampton Roads, USA.
5. Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. On the search for noise sources by a group of interacting auvs using a genetic algorithm // Underwater Research and Robotics. 2024. No. 2 (48). P. 26–37.
6. Lin Y. et al. A Multi Autonomous Underwater Vehicle System for Autonomous Tracking of Marine Life // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34, No. 4. P. 757–774
7. I. E. Tuphanov and A. F. Scherbatyuk. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem. Automation and Remote Control, 2015, Vol. 76, No. 5, pp. 885–896.
8. Thompson J. et al. Multi-AUV Placement for Coverage Maximization in Underwater Optical Wireless Sensor Networks // Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS 2020 MTS/IEEE San-Diego, USA.
9. Scherbatyuk, A.F. Multiple AUV Navigation without Using Acoustic Beacons // Gyroscopy and Navigation, No. 4, 2022, pp. 106–121.
10. Scherbatyuk, A.F. A Cost-Effective Method of Navigation for Inexpensive AUVs Using a Short-Baseline Acoustic Positioning System. // Gyroscopy and Navigation, No. 4, 2025, pp. 116–129.
11. Atwood D. K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles // In Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. September, 1995, pp. 202–208.
12. Borodin V., Smirnov G., Tolstyakova N. et al. Hydroacoustic Navigation Aids, Leningrad: Sudostorenje, 1983, 263 p.
13. Krasovskii, A.A., Beloglazov, I.N., and Chigin, G.P. Theory of Correlation-Extreme Navigation Systems, Moscow: Nauka, 1979, 448 p.
14. Stepanov, O.A. Application of the Theory of Nonlinear Filtering in the Problems of Navigation Information Processing, St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 1998, 370 p.
15. Vasil'ev, V.A., Isaev, A.M., Stepanov, O.A., and Toropov, A.B., Monte Carlo methods in measurement information processing using resampling procedures, Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 2026, no. 1.

Information about the author

Scherbatyuk Alexander Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, corr.-member of RAS, chief scientist
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: designing and application of marine robotic systems, positioning of unmanned underwater vehicles
Phone: +7(902)52-38-156. **E-mail:** alex-scherba@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7600-6711. **Scopus Author ID:** 6507204366
Web of Science Researcher ID: K-8737-2017