

# АЛГОРИТМ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ГРУППЫ АНПА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ И РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Д.А. Щербатюк**

Использование групповой работы АНПА находит все более широкое распространение, так как открывает возможности для решения новых задач, а также позволяет повысить эффективность выполнения типовых миссий по сравнению с использованием одиночного аппарата. Кроме того, использование групп АНПА обеспечивает более высокую надежность робототехнического комплекса в целом за счет введения некоторого уровня избыточности, позволяющего получать более качественные результаты и добиваться успешного решения поставленной задачи даже в случае возникновения аварийных ситуаций, например, выхода из строя одного или нескольких АНПА. Навигационное обеспечение групповой работы АНПА предполагает одновременное определение координат всех АНПА, входящих в группу. Асинхронная гидроакустическая навигационная система с длинной базой ГАНС ДБ осуществляет поочередное координирование отдельных АНПА и не позволяет решить данную навигационную задачу одновременно для всех аппаратов в группе. Синхронные ГАНС требуют наличия дорогостоящих прецизионных систем времени для обеспечения требуемой точности навигации. В работе рассматривается задача обеспечения навигации групп АНПА при помощи разностно-дальномерной гидроакустической навигационной системы с длинной базой. Представлен алгоритм решения навигационной задачи разностно-дальномерной ГАНС, основанный на использовании фильтра частиц. Приведены полученные с помощью компьютерного моделирования результаты работы алгоритма, подтверждающие его работоспособность и эффективность.

**Ключевые слова:** групповая навигация АНПА, гидроакустическая навигационная система с длинной базой, разностно-дальномерная навигационная система, фильтр частиц.

## 1. Введение

В навигационной системе АНПА выходная информация от навигационных датчиков совместно обрабатывается с помощью навигационного алгоритма для оптимизации точностных характеристик навигационной системы. В настоящее время для построения навигационных алгоритмов широко используются модификации фильтра Калмана (ExtendedKalmanFiltering /EKF/ и UnscentedKalmanFilter /UKF/), а также варианты фильтра частиц (ParticleFilter /PF/) [1–8].

Алгоритм EKF решает проблему фильтрации в системах с незначительной нелинейностью. Однако точность фильтрации серьезно снижается, когда нелинейность высока. Алгоритм UKF может решать проблему фильтрации нелинейной системы с более

высокой точностью с помощью unscentedtransform /UT/ преобразования, обеспечивая более точную оценку дисперсии состояния системы. Однако когда система является нелинейной и шумы негауссовские, эффективность фильтрации резко падает и процесс оценивания может расходиться [7]. Поскольку алгоритм PF подходит для нелинейных и негауссовских сред, ему уделяется все больше внимания при разработке навигационных алгоритмов оценивания местоположения АНПА.

В статье [1] представлены комплексное тестирование и анализ структуры фильтра частиц для навигации АНПА на местности в реальном времени. Цель состоит в том, чтобы получить географическую привязку для навигационной системы АНПА с использованием эталонных батиметрических карт

и батиметрических измерений. Алгоритм непрерывного фильтра частиц для решения задач нелинейного оценивания сигналов рассмотрен в статье [2]. Предложенный алгоритм может применяться в задачах оценивания местоположения АНПА при обработке навигационных данных. Его апробация проведена на примере решения задачи оценивания погрешности навигационной системы по данным карты геофизического поля.

В работе [3] в основе разрабатываемой НС для АНПА лежит инерциальная навигационная схема, дополняемая данными о скорости и положении. Данные о положении формируются на основе информации от акустической системы навигации и связи. Описан навигационный алгоритм на основе фильтра частиц, представлены экспериментальные результаты и детали реализации. В статье [4] представлен алгоритм на основе фильтра частиц, позволяющий локализовать свободно дрейфующий подводный аппарат. Этот аппарат наряду с данными от навигационной системы с ультракороткой базой (USBL) в качестве дополнительной информации использует изображения дна. Подход к локализации автономного подводного аппарата на основе данных от гидролокатора в структурированной и неструктурированной среде описан в статье [5]. Система реализует алгоритм с фильтром частиц для представления состояния подводного аппарата и использует гидролокатор с механическим сканированием для получения профилей дальности. Предлагается модификация стандартного алгоритма фильтрации частиц, предназначенная для более эффективного исследования пространства состояний и снижения вычислительной сложности. Предложенная система продемонстрировала высокую надежность и возможности работы в реальном времени в ходе испытаний на борту подводного аппарата. В статье [6] эти же авторы представляют расширение стандартного подхода к использованию фильтра частиц, основанное на семантической информации о среде. В сравнении с геометрическим подходом данный метод демонстрирует преимущества при выполнении локализации подводного аппарата.

Использование детерминированного фильтра частиц для локализации АНПА описано в статье [7]. Путем сравнения результатов моделирования алгоритма EKF, PF и алгоритма детерминированного PF (DPF) при решении задачи позиционирования АНПА подтверждается осуществимость и точность алгоритма DPF. Интегрированная система планирования движения и навигации по геомагнитному полю рассмотрена в статье [8]. Из-за нелинейного характера модели измерения, которая связывает данные

от установленных на АНПА магнитных датчиков с его трехмерным положением и ориентацией относительно морского дна, представленного на карте, задача навигации решается с использованием фильтра частиц с предварительной коррекцией. Результаты испытаний в море с АНПА Medusa подтвердили работоспособность метода.

Статья [9] посвящена вопросу навигации АНПА с помощью одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого автономным необитаемым водным (движущимся по поверхности) аппаратом /АНВА/. Исследованы два алгоритма оценивания местоположения АНПА, использующие информацию о дальности до мобильного гидроакустического маяка и данные бортовой автономной навигационной системы. Первый алгоритм основан на применении расширенного фильтра Калмана, а второй использует фильтр частиц. Приведены данные моделирования работы рассмотренных алгоритмов и некоторые результаты морских экспериментов. Навигационная привязка разработанной системы обеспечивается с помощью DGPS, мобильная часть которой установлена на АНВА. Вопрос оценки точности данного навигационного комплекса, включающего АНПА и АНВА, с помощью DGPS рассмотрен в статье [10]. Результаты морских испытаний подтверждают достаточно высокую точность оценивания местоположения АНПА с помощью разработанной мобильной навигационной системы.

В последние годы в связи с более широким использованием групповой работы АНПА актуальным является решение задачи навигационного обеспечения, которое предполагает одновременное определение координат всех АНПА, входящих в группу. В статье [11] приведен обзор подходов, предназначенных для решения задач навигации групп АНПА. Одним из способов решения поставленной задачи является использование разностно-дальномерной ГАНС. Некоторые подходы к решению разностно-дальномерной навигационной задачи рассмотрены в [12–15]. В работах [16–18] представлены два разработанных навигационных алгоритма, реализующих переборный и аналитический методы решения разностно-дальномерной задачи. В них также рассмотрены алгоритмы позиционирования отдельных АНПА, находящихся в зоне акустической тени ГАНС ДБ. Для этого используются измерения взаимных дистанций между АНПА в группе одновременно с измерениями дистанций до маяков ГАНС. Данные, полученные с помощью компьютерного моделирования работы данных алгоритмов, а также предварительные результаты морских испытаний работы исследуемой

навигационной системы подтверждают ее работоспособность и эффективность. В статьях [19–20] рассмотрены принципы работы элементов разностно-дальномерной гидроакустической системы, использованных в этих морских испытаниях.

В представленной работе в разделе 2 рассмотрен метод групповой навигации АНПА с использованием синхронной ГАНС ДБ, работающей в разностно-дальномерном /РД/ режиме. В разделе 3 описан алгоритм решения навигационной задачи разностно-дальномерной ГАНС, основанный на использовании фильтра частиц /ФЧ/. Исследование работоспособности предложенного алгоритма выполнено путем компьютерного моделирования, результаты которого приведены в разделе 4.

## 2. Метод групповой навигации АНПА с использованием разностно-дальномерной ГАНС ДБ и системы счисления пути

Рассмотрим систему координат, жестко связанную с ведущим маяком, оси  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$  которой направлены соответственно на север, восток и вниз к центру Земли. Система счисления пути /ССП/ на каждом АНПА в группе включает абсолютный датчик скорости (доплеровский лаг), датчик курса и датчик глубины. С использованием информации от этих датчиков выполняется расчет местоположения каждого АНПА в промежутках между тактами работы РД ГАНС в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \hat{x}(tk) &= \tilde{x}(tk-1) + \sum_{m=1}^M v(tm) * \cos(\varphi(tm)) * \Delta, \\ \hat{y}(tk) &= \tilde{y}(tk-1) + \sum_{m=1}^M v(tm) * \sin(\varphi(tm)) * \Delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $(\hat{x}(t_k), \hat{y}(t_k))$  – априорная оценка местоположения рассматриваемого АНПА от ССП на  $k$ -м такте работы РД ГАНС,  $(\tilde{x}(t_{k-1}), \tilde{y}(t_{k-1}))$  – оценка местоположения рассматриваемого АНПА на  $(k-1)$ -м такте работы РД ГАНС, полученная с помощью алгоритма на основе ФЧ,  $\Delta$  – период работы ССП,  $tm = t_{k-1} + m * \Delta$ ,  $t_k = t_{k-1} + M * \Delta$ ,  $v(tm)$  и  $\varphi(tm)$  – скорость и курс от датчиков ССП в промежутке между тактами работы РД ГАНС.

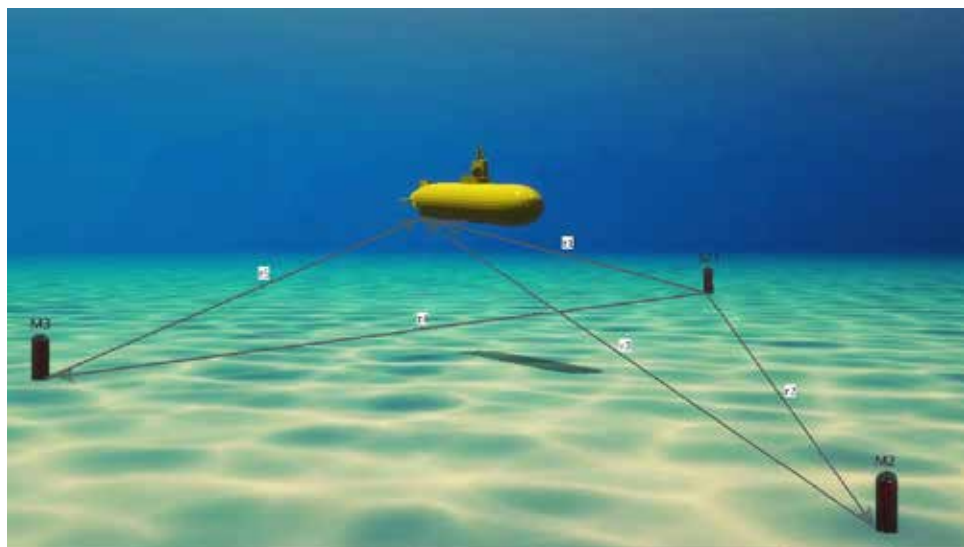


Рис. 1. Пути распространения сигналов от ведущего маяка М1 к ведомым маякам М2 и М3 и АНПА

Предполагается, что координата  $z$  измеряется с необходимой точностью с помощью датчика глубины.

В состав РД ГАНС включены три акустических маяка, работающих в специальном режиме. Один из маяков является ведущим и определяет период работы всей системы.

Ведущий маяк периодически излучает навигационный пакет, в котором содержатся данные о собственных координатах. Второй и третий маяки ГАНС являются ведомыми. Они и все АНПА группы принимают навигационный пакет и фиксируют время его прихода.

Ведомые маяки при получении запроса от ведущего маяка излучают собственные навигационные пакеты, в которых передают информацию о своих координатах. Эти пакеты также принимаются на всех аппаратах группы с фиксацией времени их прихода. В каждом цикле работы РД ГАНС все АНПА определяют моменты прихода сигналов от трех маяков ГАНС, а также получают их координаты. Перед началом работы РД ГАНС координаты маяков определяются с требуемой точностью и записываются во встроенную память маяков.

На рис. 1 показаны пути распространения сигналов от ведущего маяка М1 к ведомым маякам М2 и М3 и АНПА. Предположим, что ведущий маяк М1 излучает очередной сигнал в момент  $t_0$  и время распространения сигнала от него до АНПА равно  $\tau_1$ . Времена распространения сигналов от ведущего маяка М1 до ведомых маяков М2 и М3 соответственно  $\tau_2$  и  $\tau_4$ . Времена распространения сигналов от ведомых маяков М2 и М3 до АНПА соответственно  $\tau_3$  и  $\tau_5$ . На основе этих данных можно составить следу-

ющие уравнения для времени прихода  $t_{A1}$  сигнала к АНПА от ведущего маяка М1 и времен прихода  $t_{A2}$  и  $t_{A3}$  сигналов к АНПА от ведомых маяков М2 и М3:

$$\begin{aligned} t_{A1} &= t_0 + \tau_1, \\ t_{A2} &= t_0 + \tau_2 + \tau_3, \\ t_{A3} &= t_0 + \tau_4 + \tau_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда для  $t_{A12}$  – разности времени прихода сигналов к АНПА между М1 и М2 и  $t_{A13}$  – разности времени прихода сигналов к АНПА между М1 и М3 получаем:

$$\begin{aligned} t_{A12} &= \tau_2 + \tau_3 - \tau_1, \\ t_{A13} &= \tau_4 + \tau_5 - \tau_1. \end{aligned} \quad (3)$$

В данных выражениях отсутствует неизвестное время  $t_0$  момента излучения сигнала ведущим маяком М1.

Функциональная схема навигационной системы АНПА, использующая информацию от ССП и РД ГАНС показана на рис. 2. Необходимо разработать алгоритм, который на основе измерений  $t_{A12}$  и  $t_{A13}$ , получаемых в каждом цикле работы РД ГАНС, и показаний датчиков ССП позволит сформировать оценку местоположения АНПА ( $\tilde{x}, \tilde{y}$ ) с требуемой точностью.

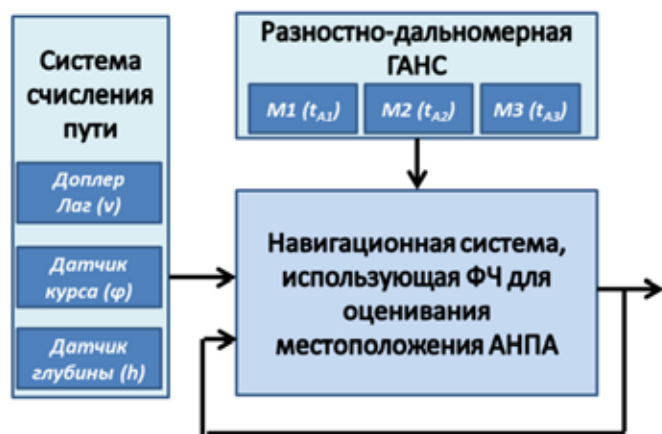


Рис. 2. Функциональная схема НС АНПА на основе ССП и РД ГАНС

### 3. Решение разностно-дальномерной задачи с использованием алгоритма на основе фильтра частиц

Алгоритм фильтрации частиц основан на методе Монте-Карло и байесовской теории принятия решений. Основная идея состоит в том, чтобы сначала сгенерировать набор случайных выборок (частиц) в пространстве состояний в соответствии с эмпирическим (априорным) распределением вектора состояния системы, а затем постоянно корректировать веса

и положения частиц в соответствии с наблюдаемыми величинами и изменять исходное эмпирическое условное распределение.

В данном разделе описан навигационный алгоритм, разработанный на основе фильтра частиц, который позволяет получить оценку местоположения АНПА на основе информации о временах прихода сигналов от маяков на один из АНПА группы и данных, полученных от бортовой системы счисления пути. Для оценки фильтр создает множество частиц, которые в начальный момент времени расположены в области наиболее вероятного местоположения АНПА в момент начала его работы. На каждой итерации цикла обсервации фильтр отбрасывает частицы, которые не проходят проверку достоверности. Таким образом, из множества частиц спустя определенное время будут выделены частицы с наибольшими весами, которые наиболее близки к истинному значению местоположения АНПА.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3. Алгоритм на основе фильтра частиц состоит из нескольких этапов:

*Инициализация.* Прежде чем приступить к итерациям, фильтр частиц следует инициализировать – задать параметры, начальное распределение и прочие условия работы фильтра. Основным параметр фильтра частиц — число используемых частиц (обозначим это число  $N$ ). Начальное распределение частиц зависит от априорной информации. Чем больше частиц — тем точнее фильтр позволяет оценивать местоположение АНПА и тем больше вычислений нужно проводить на каждой итерации основного цикла. Нам известна область наиболее вероятного местоположения АНПА в начале работы, следовательно, облако частиц располагается в указанной области с заданным радиусом. Координаты точки погружения АНПА фиксируются с помощью приемника спутниковой навигации, а радиус окружности выбирается с учетом возможного неконтролируемого дрейфа АНПА за время погружения вследствие наличия течений и ошибок счисления пути.

Основной параметр каждой частицы – её вес. Вес частицы определяет вероятность того, что координаты этой частицы совпадают с координатами АНПА. Так как мы предполагаем, что полное множество частиц описывает положение данного аппарата с вероятностью 100%, то суммарный вес всех частиц равен единице. При этом вес всех частиц в начальный момент времени принимается одинаковым и равным  $1/N$ .

*Движение.* На данном этапе аппарат совершает перемещение на интервале между тактами работы РД ГАНС. Информация о перемещении АНПА по-

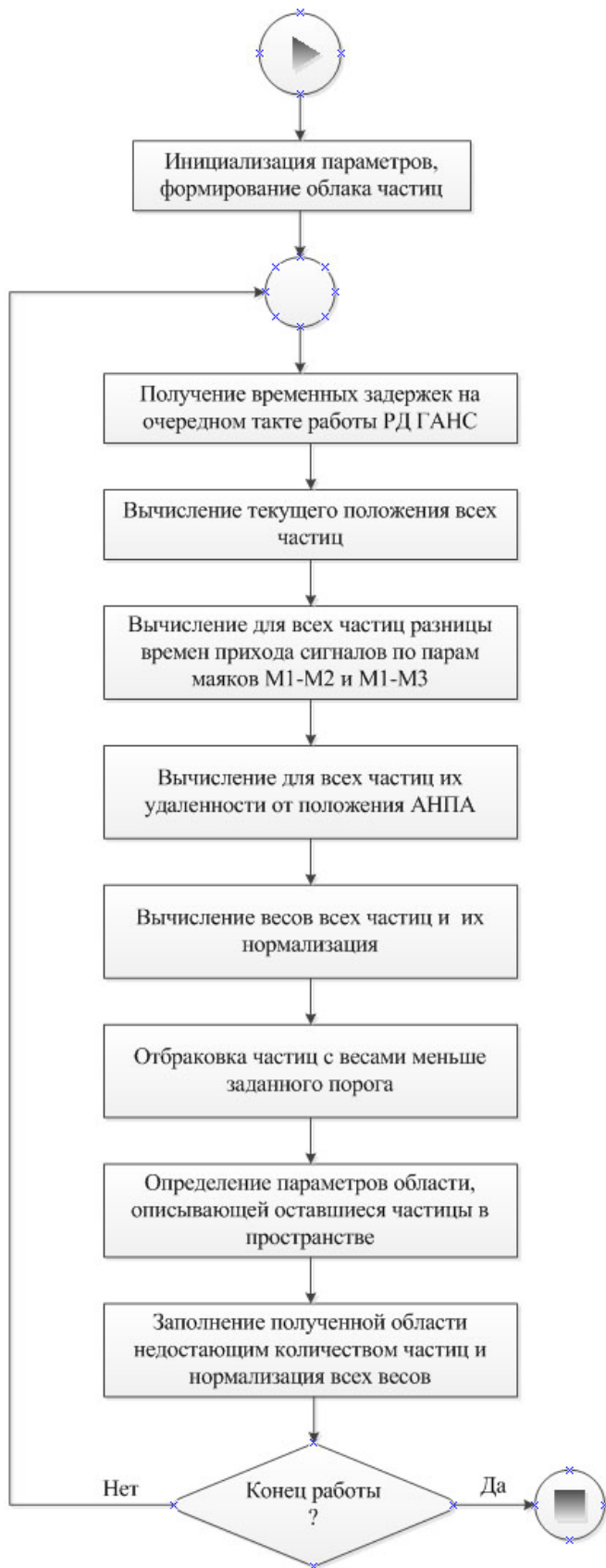


Рис. 3. Блок-схема алгоритма на основе ФЧ

ступает от бортовой системы счисления пути. Каждая частица представляет собою модель АНПА и движется соответственно как АНПА. Так как счисление местоположения происходит с погрешностями, ошибка определения местоположения возрастает.

*Коррекция.* После измерения дальностей от АНПА до гидроакустических навигационных маяков М1, М2 и М3 вычисляются разности времени прихода сигналов к АНПА между М1 и М2 и между М1 и М3. Затем выполняется расчет этих разностей для текущего местоположения каждой частицы в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} T_{A12} &= (d2 + d3 - d1) / c, \\ T_{A13} &= (d4 + d5 - d1) / c, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $c$  – скорость распространения звукового сигнала в воде,  $d1, d2, d3, d4$  и  $d5$  – соответствующие дистанции между М1, М2, М3 и АНПА, вычисляемые в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} d1 &= \sqrt{(x_{M1} - x_i)^2 + (y_{M1} - y_i)^2 + (z_{M1} - z_i)^2} \\ d1 &= \sqrt{(x_{M1} - x_i)^2 + (y_{M1} - y_i)^2 + (z_{M1} - z_i)^2} \\ d3 &= \sqrt{(x_{M2} - x_i)^2 + (y_{M2} - y_i)^2 + (z_{M2} - z_i)^2} \\ d4 &= \sqrt{(x_{M1} - x_{M3})^2 + (y_{M1} - y_{M3})^2 + (z_{M1} - z_{M3})^2} \\ d5 &= \sqrt{(x_{M3} - x_i)^2 + (y_{M3} - y_i)^2 + (z_{M3} - z_i)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $(x_{Mj}, y_{Mj}, z_{Mj})$  – координаты маяков ( $j=1,2,3$ ),  $(x_i, y_i, z_i)$  – координаты  $i$  – й частицы.

Затем рассчитывается приращение весов частиц  $\Delta\omega_i$ , учитывающее степень соответствия координат частиц полученным измерениям дальностей до них:

$$\Delta\omega_i = (1 - w_i / \sum w_i) / (N - 1), \quad (6)$$

где  $w_i = \sqrt{(T_{A12i} - t_{A12i})^2 + (T_{A13i} - t_{A13i})^2}$ . После этого новые полученные веса частиц  $\omega_i$  нормализуются.

*Регенерация частиц.* В процессе длительной работы фильтра лишь небольшое число частиц будет иметь существенные, отличные от нуля, веса. Большинство частиц вырождаются (их веса уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми).

Частицы, имеющие малые веса, удаляются, и вместо них создаются новые частицы, которые распределяются в некоторой области вокруг оставшихся частиц пропорционально их весам. Затем веса всех частиц из вновь сформированного облака нормализуются.

В качестве оценки местоположения подводного аппарата выбираются либо координаты частицы с максимальным весом, превышающим заданный по-

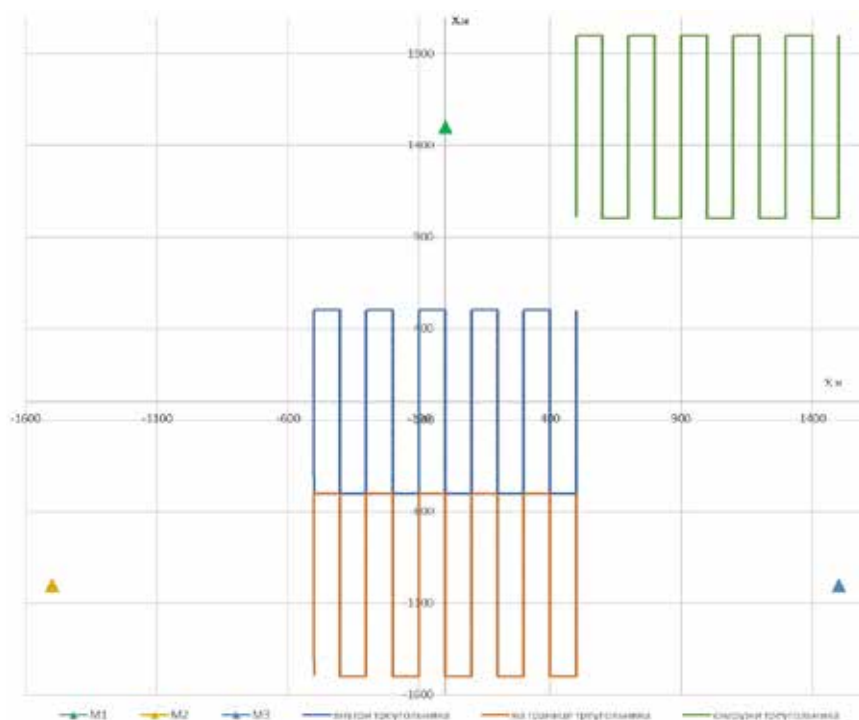


Рис. 4. Траектории движения АНПА в процессе модельных экспериментов

торий движения по отношению к маяковой базе. Целью моделирования являлось исследование точности и работоспособности алгоритма оценивания местоположения АНПА на основе ФЧ. Моделирование выполнялось методом Монте-Карло, при этом каждый эксперимент выполнялся в цикле по 100 раз с разными случайными ошибками и на основе полученных результатов рассчитывались среднее значение и дисперсия.

На рис. 4 приведены траектории движения АНПА, когда он маневрирует на глубине порядка 2000 метров. АНПА выполняет миссию «меандр» внутри треугольника, в вершинах которого расположены маяки, снаружи треугольника и на его границе, то входя внутрь треугольника, то выходя из него. В первом случае АНПА двигался по траектории меандр из точки с координатами (-498.616; -500) и траектория лежит полностью внутри треугольника маяковой базы. Вторая траектория АНПА находится вне треугольника и представляет меандр из точки с координатами (1000.474; 500). Третья траектория АНПА повторяет траекторию меандр из точки с координатами (-1497.96; -500), при этом часть его траектории находится снаружи маяковой базы и часть внутри. АНПА перемещается с постоянной скоростью 1 м/с. Маяки ДБ ГАНС статичные и расположены в координатах М1 (1500; 0; 2325), М2 (-1000;

рог, либо среднее взвешенное значение координат всех частиц в соответствии с выражением:

$$\tilde{x}(tk) = \sum_{i=1}^N x_{k,i} * \omega_i, \quad \tilde{y}(tk) = \sum_{i=1}^N y_{k,i} * \omega_i. \quad (7)$$

В качестве показателя, характеризующего точность оценивания и формирующего эллипс ошибок, используется ковариационная матрица, рассчитываемая для имеющегося облака частиц  $X_{k,i} = (x_{k,i}, y_{k,i}) (i=1, N)$  в соответствии с выражением

$$P = \begin{pmatrix} P_x & P_{xy} \\ P_{xy} & P_y \end{pmatrix} = E \left[ (X - EX)(X - EX)^T \right] = \sum_{i=1}^N \omega_i (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T \quad (8)$$

#### 4. Некоторые результаты моделирования работы алгоритма решения разностно-дальномерной задачи на основе фильтра частиц

Для исследования описанного выше алгоритма была разработана система моделирования на языке С++ в программе QtCreator. Данная система моделирования реализует метод с использованием ФЧ для решения разностно-дальномерной задачи.

Была выполнена серия модельных экспериментов с различными параметрами движения, ошибок и расположением траек-

ектория лежит полностью внутри треугольника маяковой базы. Вторая траектория АНПА находится вне треугольника и представляет меандр из точки с координатами (1000.474; 500). Третья траектория АНПА повторяет траекторию меандр из точки с координатами (-1497.96; -500), при этом часть его траектории находится снаружи маяковой базы и часть внутри. АНПА перемещается с постоянной скоростью 1 м/с. Маяки ДБ ГАНС статичные и расположены в координатах М1 (1500; 0; 2325), М2 (-1000;

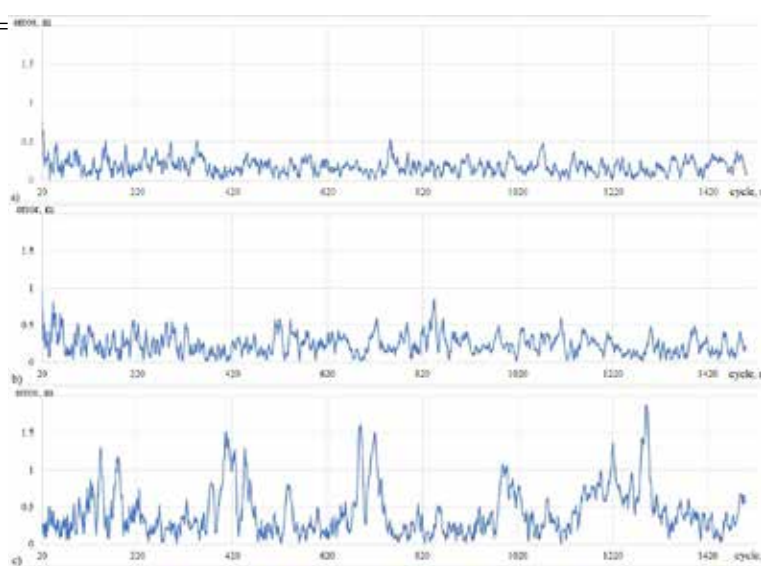


Рис. 5. Процессы оценивания координат АНПА с использованием фильтра частиц, когда АНПА: а – внутри треугольника с маяками в вершинах, б – снаружи треугольника и с – на его границе

Статистические характеристики работы алгоритма

	Среднее значение ошибки $\epsilon$ , м	Среднеквадратическое отклонение ошибки $\sigma$ , м	Количество циклов (К)
1. Траектория АНПА внутри треугольника с маяками в вершинах	0.15	0.4	4
2. Траектория АНПА снаружи треугольника с маяками в вершинах	0.25	0.75	11
3. Траектория АНПА на границе треугольника с маяками в вершинах	0.2	0.60	7

-1500; 2000) и М3 (-1000; 1500; 2150). Период работы ГАНС был принят равным 8 с. Продолжительность миссии составляла 3.5 ч. В процессе моделирования алгоритма на основе фильтра частиц использовалось облако, состоящее из 10000 частиц. После каждого цикла отбрасывалось около 10% частиц от общего количества и формировались новые в местах наиболее вероятного местонахождения АНПА.

На измерения наклонной дальности между АНПА и маяком аддитивно накладывалась нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 0,1% от истинного значения дистанции. Измерения скорости движения АНПА искажались путем прибавления к программному значению шума, который представлял собой нормально распределенную случайную

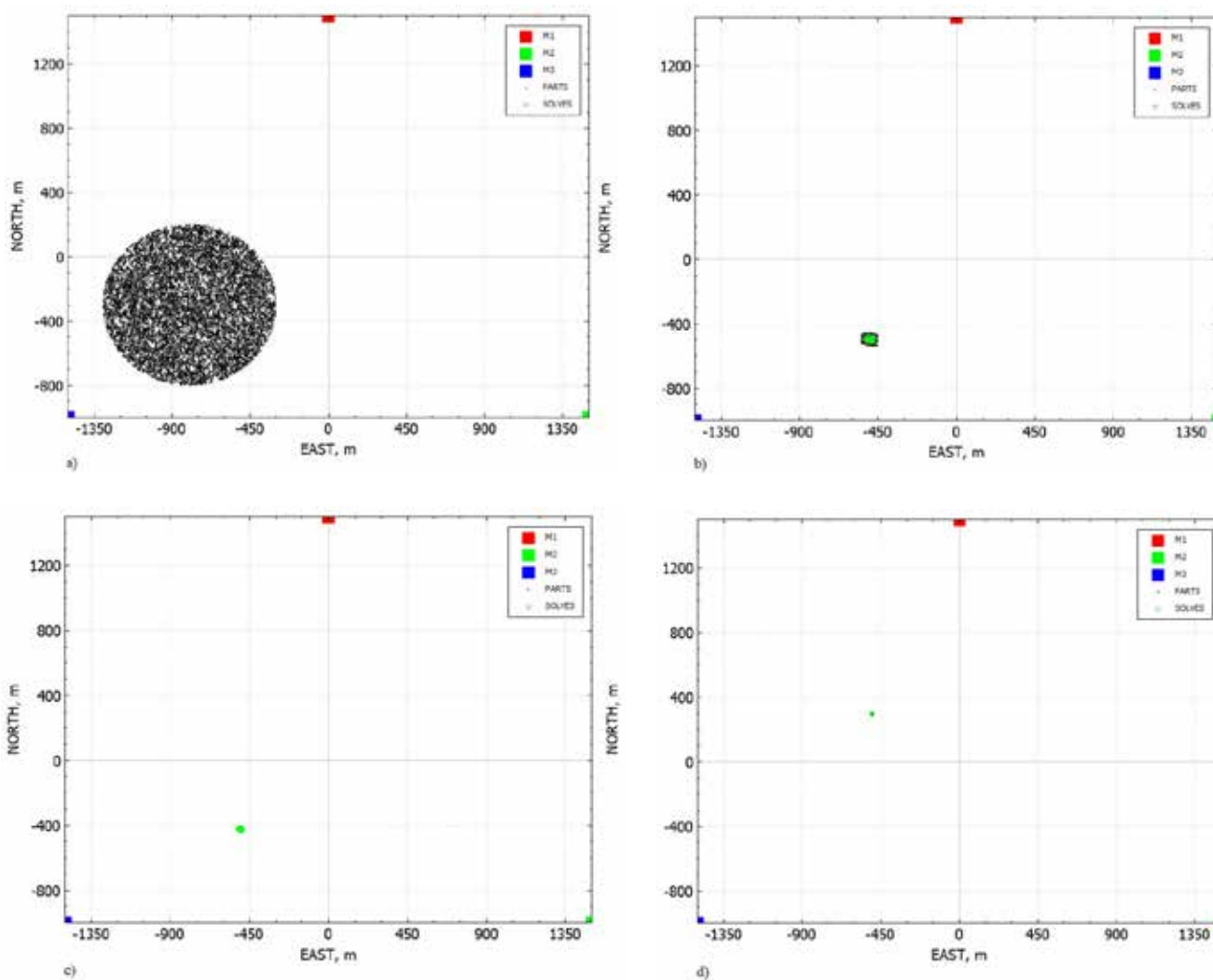


Рис. 6. Процессы оценивания координат АНПА с использованием фильтра частиц во время выполнения миссии АНПА, когда он двигался по траектории внутри маяковой базы. На графике показано изменение и перемещение облака частиц: а – после генерации, б – после 1-го цикла обсервации, с – после 10-го цикла обсервации и d – после 100 циклов обсервации

величину с постоянным смещением 0,01 м/с и среднеквадратическим отклонением 0,05 м/с. Ошибки измерения курса АНПА моделировались нормально распределенным случайным значением с постоянным смещением 0,1 град, среднеквадратическим отклонением 0,5 град. Постоянные погрешности измерения скорости и курса за 4 часа работы приводят к ошибке ССП, составляющей около 150 м.

На рис. 5 приведены три процесса оценивания координат АНПА, когда АНПА: а) внутри треугольника с маяками в вершинах, в) снаружи треугольника и с) на его границе. Среднее значение ошибки  $\varepsilon$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  и количество циклов  $K$  работы ГАНС, необходимых для оценивания положения АНПА с ошибкой менее 1,5 метра, приведены в таблице. На рис. 6 видно перемещение и уменьшение размеров облака по мере перемещения АНПА, соответственно оценка местоположения производится точнее.

## Заключение

Описанный разностно-дальномерный подход позволяет обеспечить одновременную навигацию для всех АНПА в группе, поскольку не требует выделения каждому из АНПА временного окна для опроса маяков ГАНС. Представленный в работе алгоритм на основе ФЧ позволяет с требуемой точностью решать задачу определения координат АНПА при использовании рассмотренной разностно-дальномерной ГАНС.

## Об авторах

**ЩЕРБАТЮК Дарья Александровна**, младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А

**Научные интересы:** алгоритмическое и программное обеспечение навигационных систем морских робототехнических комплексов

Тел. :+7(914)343-50-38

E-mail: darya.shcherbatyuk@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-3436-1889

## Для цитирования:

Щербатюк Д.А. АЛГОРИТМ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ГРУППЫ АНПА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА ЧАСТИЦ И РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 50–59. DOI: DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_05.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Donovan G.T. Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter // IEEE Journal of oceanic engineering. 2012. Vol. 37, No. 3. P. 431–445.
2. Рыбаков К. А. Решение нелинейных задач оценивания при обработке навигационных данных с использованием непрерывного фильтра частиц // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 4 (103). С. 82–95.
3. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE. San Diego, USA, 2020.
4. Casagrande D., Krasnosky K., Roman C. Localization of a Drifting Underwater Vehicle Using a Terrain-Based Particle Filter // Proc. of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Seattle, USA, 2019.
5. Maurelli F., Krupinski S., Petillot Y., Salvi J. A particle filter approach for AUV localization // Proc. of the OCEANS 2008 MTS/IEEE. Québec, Canada, 2008.
6. Maurelli F., Krupinski S. A semantic-aided particle filter approach for AUV localization // Proc. of the OCEANS 2018 MTS/IEEE. Kobe, Japan, 2018.
7. Fei X., Shen Y., Yan T. Application of AUV Navigation Based on Deterministic Particle Filter Algorithm // Proc. of the OCEANS 2018 MTS/IEEE. Charleston, USA, 2018.
8. Quintas J., Hung N., Crasta N., Curado-Teixeira F., Lima P., Pascoal A., Kaminer I. AUV path planning, navigation, and control using geophysical data // Proc. of the OCEANS 2019 MTS/IEEE. Marseille, France, 2019.
9. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов одноплатформенной мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. №4. С. 47–52.
10. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. О методе оценивания точности работы одноплатформенной мобильной навигационной системы подводного аппарата с помощью водного аппарата, оснащенного DGPS // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1. С. 31–40.
11. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк Д.А., Щербатюк А.Ф. О методах обеспечения навигации групп АНПА: краткий обзор // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 27–36.
12. 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. New Hampshire, 1995. P. 202–208.
13. Cruz N., Matos A. Simultaneous acoustic navigation of multiple AUVs // Proc. of the IFAC Conference on MCMC. Lisbon, Portugal, 2006.
14. Melo J., Matos A. Towards LBL positioning systems for multiple vehicles // Proc. of the OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016.
15. Melo J., Matos A. Tracking multiple Autonomous Underwater Vehicles // Autonomous Robots. 2018. Vol. 43, No. 4.
16. Dubrovina F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Navigation for AUV, located in the shadow area of LBL, during the group operations // Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference. Singapore, 2020.
17. Dubrovina F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation // Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference. Singapore, 2020.
18. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А. Разностно-дальномерная система навигации для обеспечения групповой работы морских робототехнических комплексов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 2 (32). С. 22–33.
19. Кебкел К.Г. и др. Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования автономных обитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 4–12.
20. Кулик С.Ю., Родионов А.Ю., Голов А.А., Унру П.П. Оценка применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 30–38



# ALGORITHM FOR NAVIGATION OF AUV GROUP BASED ON PARTICLE FILTER AND DIFFERENTIAL-RANGING ACOUSTIC POSITIONING SYSTEM

**D.A. Shcherbatyuk**

Group AUV operations found more and more wide expansion because open possibility for new tasks solution and allow enlarge effectiveness of execution for typical missions in comparison with one vehicle operation. Also the AUV group usage provides more high reliability of the operation on the whole by involving some level of superfluity, allowing more quality results and successful decision of current task even in the case of damage situation, for example, out of order for one or more AUVs. Navigation of the AUV group operation supposes simultaneous position detection for all AUV in the group. Asynchronous acoustic positioning systems with long base line fulfill positioning of separate AUV by turns and can not solve the navigation task simultaneously for all vehicles in the group. Synchronous acoustic positioning systems demand expensive precise systems of time to provide the needed precision of navigation. In the paper the task of AUV group navigation with help of the differential-ranging acoustic positioning system with long base line is considered. The algorithm for solution of navigation task for differential-ranging acoustic positioning system based on use of particle filter is described. The results of computer simulation for algorithm operation are supplemented that prove its effectiveness.

**Key words.** AUV group navigation, long base line acoustic positioning system, differential-ranging acoustic positioning system, particle filter.

## References

1. Donovan G.T. Position Error Correction for an Autonomous Underwater Vehicle Inertial Navigation System (INS) Using a Particle Filter // *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 37, no. 3, July 2012, p.431-445.
2. Rybakov, K.A. Solving the Nonlinear Problems of Estimation for Navigation Data Processing Using Continuous-Time Particle Filter. *Gyroscopy and Navigation*. Vol. 26, № 4 (103), 2018, p. 82-95.
3. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE San-Diego, USA*.
4. Casagrande D., Krasnosky K., Roman C. Localization of a Drifting Underwater Vehicle Using a Terrain-Based Particle Filter // *Proc. of the OCEANS 2019 MTS/IEEE Seattle, USA*.
5. Maurelli F., Krupinski S., Petillot Y., Salvi J. A particle filter approach for AUV localization // *Proc. of the OCEANS 2008 MTS/IEEE Québec, Canada*
6. Maurelli F., Krupinski S. A semantic-aided particle filter approach for AUV localization // *Proc. of the OCEANS 2018 MTS/IEEE, Kobe, Japan*
7. Fei X., Shen Y., Yan T. Application of AUV Navigation Based on Deterministic Particle Filter Algorithm // *Proceedings of the OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, USA*.
8. Quintas J., Hung N., Crasta N., Curado-Teixeira F., Lima P., Pascoal A., Kaminer I. AUV path planning, navigation, and control using geophysical data // *Proc. of the OCEANS 2019 MTS/IEEE, Marseille, France*
9. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Investigation of some algorithms for one beacon mobile navigation of AUV: simulation results and marine trials // *Gyroscopy and Navigation*. № 4, 2015, p. 47-52.
10. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. On the method to estimate operation of single mobile beacon positioning system of underwater vehicle with the help of surface vehicle equipped with DGPS // *Underwater Investigations and Robotics*, №1, 2016, p.31-40.
11. Vaulin Yu. V., Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Shcherbatyuk D.A. About methods for navigation of AUV groups: short review // *Underwater Investigations and Robotics*. 2019. № 4 (30). P. 27–36.
12. 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. P. 202-208.
13. Cruz N., Matos A. Simultaneous acoustic navigation of multiple AUVs // *Proc. of the IFAC Conference on MCMC, September 2006, Lisbon, Portugal*.
14. Melo J., Matos A. Towards LBL positioning systems for multiple vehicles // *Proc. of the OCEANS 2016, Shanghai, China*.
15. Melo J., Matos A. Tracking multiple Autonomous Underwater Vehicles // *Autonomous Robots*, Vol. 43, No.4, January 2018.
16. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Navigation for AUV, located in the shadow area of LBL, during the group operations // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference, Singapore-U.S. Gulf Coast*.
17. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Rodionov A.Yu., Vaulin Yu.V. Some algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation // *Proc. of the OCEANS 2020 MTS/IEEE Conference, Singapore-U.S. Gulf Coast*.
18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Scherbatyuk D.A., Vaulin Yu.V. Differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation // *Underwater Investigation and Robotics*. 2020. № 2 (32). P. 22–33.
19. Kebkal K.G., Kebkal A.G., Glushko E.V., Kebkal V.K., Sebast'yao L., Paskoal' A., Ribeyro Dzh., Sil'va G., Ribeyro M., Indiveri Dzh. Hydro-acoustic modems with integrated cesium clocks for positioning of AUV // *Underwater Investigation and Robotics*. 2019. No. 2 (28). P. 4–12.
20. Kulik S. Yu., Rodionov A.Yu., Unru P.P., Golov A.A. Application of multi-frequency signals with constant envelope in underwater acoustic communication systems // *Underwater Investigation and Robotics*. 2019. № 3 (29). P. 30–38.

## About the authors

**SHCHERBATYUK Darya Aleksandrovna**, research scientist  
Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of the  
Russian Academy of Sciences

**Address:** 690091, Vladivostok, Sukhanov str., 5a

**Research interests:** algorithms and software for navigation systems  
of marine robotic complex

**Tel.:** +7(914)343-50-38

**E-mail:** darya.shcherbatyuk@mail.ru

**ORCID ID:** 0000-0002-3436-1889

## Recommended citation:

Shcherbatyuk D.A. ALGORITHM FOR NAVIGATION OF AUV GROUP BASED ON PARTICLE FILTER AND DIFFERENTIAL-RANGING ACOUSTIC POSITIONING SYSTEM. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 4(38). P. 50–59. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_05.

