

А. Ф. ЩЕРБАТЮК

О МЕТОДЕ НАВИГАЦИИ ГРУППЫ АНПА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

В последнее время сети автономных донных сенсоров все шире применяются для сбора различной информации в придонной области океана. Актуальной является задача передачи накопленных при этом больших массивов данных в пункт их сбора и обработки. Перспективный метод – извлечение данных из сенсорных узлов автономной подводной сети с помощью групп автономных необитаемых подводных аппаратов. Качество выполнения подводных миссий при этом определяется точностью навигации каждого подводного аппарата из состава группы. В статье предложен новый, экономичный метод организации навигационного обеспечения групповой работы аппаратов для решения современной актуальной проблемы – обслуживания автономной сети донных сенсорных станций. Метод не требует использования штатных маяков гидроакустической навигационной системы (ГАНС) с длинной базой (ДБ) и привлечения надводных средств. В процессе работы одна часть группы подводных аппаратов находится в состоянии движения к намеченным сенсорным узлам, а другая состыкована с узлами сенсорной сети, считывает накопленную в них информацию и выполняет процедуры их обслуживания. Основная идея рассматриваемого метода заключается в том, что подводные аппараты из общей группы, состыкованные с узлами сенсорной сети, используются как временные маяки разностно-дальномерной (РД) ГАНС для других движущихся аппаратов. Рассмотрены алгоритмы, обеспечивающие работу предложенного метода.

Ключевые слова: сеть автономных донных сенсоров, группа автономных необитаемых подводных аппаратов, ГАНС с длинной базой, разностно-дальномерный режим ГАНС с длинной базой.

Введение

Использование автономных датчиков в подводной среде в настоящее время является общепринятой практикой сбора данных о параметрах воды или морского дна, а также мониторинга состояния подводной инфраструктуры. Например, для предсказания подводных землетрясений и цунами применяются автономные донные сейсмографы, разработанные институтом WHOI (США) [1]. Датчики могут быть размещены на морском дне или установлены на стационарных сооружениях. При этом требуется передача больших массивов накопленных данных в пункт их сбора

Щербатюк Александр Федорович. Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН» (Владивосток). ORCID 0000-0002-7600-6711.

и обработки. Создание и прокладка кабельных донных сетей обходится чрезвычайно дорого. Используемые для организации подводной связи акустические системы имеют существенные недостатки, основной из которых – низкая скорость передачи информации.

Один из способов сбора данных под водой основан на применении телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), однако это достаточно дорого, поскольку необходимо обеспечивающее судно. В настоящее время существует потребность в новых подходах, позволяющих собирать данные с подводных датчиков для мониторинга больших удаленных и глубоководных океанических районов. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) реализуют современную и проверенную мобильную технологию, обеспечивающую более экономичный вариант сбора данных с подводных датчиков.

В связи с этим в последние годы интенсивно разрабатываются методы, связанные с извлечением данных из сенсорных узлов автономной подводной сети с помощью АНПА [2]. Группы подводных аппаратов позволяют повысить эффективность выполнения подобных миссий по сравнению с одиночным АНПА. В частности, они обеспечивают более высокую надежность робототехнического комплекса в целом за счет некоторого уровня избыточности, благодаря которому можно 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 [3] рассмотрен вопрос эффективного сбора информации с датчиков на морском дне с помощью группы АНПА на основе подводной оптической связи, а также сформулирована задача оптимального размещения подводных аппаратов таким образом, чтобы вероятность зоны покрытия всех датчиков была максимальной.

Подводная сенсорная сеть, в которой сбор информации осуществляется с помощью групп АНПА, обладает большей оперативностью развертывания, позволяет гибко подходить к собственной конфигурации и приспособлена к работе в условиях ледового покрова. АНПА наряду со сбором информации с использованием гибридных акустических и оптических систем связи способны обеспечить оперативное обслуживание сенсорных узлов и подзарядку их аккумуляторных источников питания. В статье [4] рассмотрена возможность долгосрочного развертывания крупномасштабной сети автономных подводных датчиков, питание которых обеспечивается группой АНПА во время периодических посещений.

Одной из важнейших задач, определяющих успешность и качество выполнения подводных миссий при использовании групп АНПА, является обеспечение требуемой точности навигации каждого подводного аппарата в составе группы. Существует несколько подходов к навигационному обеспечению работы группы АНПА, большая часть которых основана на использовании стационарных придонных гидроакустических маяков, хотя их установка и обслуживание – весьма затратные процедуры. Один из современных подходов заключается в том, что для навигации подводных аппаратов в группе используются отдельные опорные АНПА, местоположение которых известно с достаточной точностью за счет установленных на них высокоточных дорогостоящих навигационных систем.

Один из способов навигации подводных аппаратов в группе относительно опорных АНПА основан на применении гидроакустических навигационных систем с ульт-

тракороткой базой (ГАНС УКБ). Дальность и направление между двумя подводными аппаратами оцениваются за счет измеренных времени распространения и разности фаз прихода сигналов на элементы приемной антенны АНПА. В [5–6] предложен вариант метода навигации для группы АНПА относительно опорного подводного аппарата. Для реализации данной системы был разработан акустический модем, который обеспечивает связь и расчет относительного положения абонентов подводной сети. Эффективность метода была проверена в ходе морских испытаний с использованием подводного аппарата Tri-Dog1. Алгоритм решения навигационной задачи для группы АНПА в рамках проекта THESAURUS рассмотрен в работе [7]. Алгоритм использует данные от ГАНС УКБ и основан на фильтре Калмана (ФК) с учетом особенностей организации сетевой связи. Вместе с тем системы ГАНС УКБ характеризуются достаточно большой погрешностью при определении положения АНПА, наибольший вклад в которую вносит погрешность измерения пеленга, достигающая в УКБ-системах средней точности 2 градусов. При дальности 1 км до опорного подводного аппарата это приводит к погрешности определения координат в 35 м.

Более высокой точностью отличается ГАНС ДБ. В статье [8] описан подход, при котором для обеспечения навигации группы АНПА в ГАНС ДБ используются измерения дальностей как до мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого автономным необитаемым водным аппаратом (АНВА), так и между отдельными АНПА в группе. Алгоритм оценивания местоположения каждого подводного аппарата в группе построен на основе ФК. Рассмотрен также алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, позволяющий минимизировать погрешность определения местоположения для трех совместно работающих АНПА. Приведены некоторые результаты моделирования работы рассмотренных алгоритмов.

В статье [9] описывается ситуация применения двух АНПА, один из которых оснащен высокоточной системой навигации, а другой – навигационной системой с низкой точностью. Для снижения погрешности определения местоположения второго подводного аппарата используется информация о дальностях между ними, а его координаты определяются с помощью алгоритма на основе ФК. Приведены результаты модельных и натурных экспериментов.

Метод навигации группы АНПА без использования маяков рассмотрен в статье [10]. Имеется аппарат-лидер, который определяет свое местоположение с высокой точностью. Остальные устройства в группе определяют свое положение путем счисления с привлечением данных бортовых навигационных датчиков и уточняют его с помощью информации о дальностях до лидера. В статье [11] описана ГАНС с мобильной базой. В этом случае несколько дорогих подводных аппаратов, оснащенных высокоточной навигационной системой, выполняют роль маяков для более простых и дешевых АНПА. Описан эксперимент, в котором два исследовательских катера служат маяковой базой, а АНПА Bluefin 21 определяет по ним свое местоположение. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что подход работает. Аналогичная идея предложена в [12], где описывается ситуация, когда в миссии участвовало два типа подводных аппаратов: дорогой с навигационной системой высокой точности и дешевый с навигационной системой низкой точности. Требовалось с помощью гидроакустических модемов обеспечить навигацию дешевых аппаратов с точностью дорогих. При решении задачи метод триангуляции сравнивался с ФК, в результате последний показал более высокую точность оценивания местоположения подводных аппаратов.

В статье [13] рассмотрено навигационное обеспечение группы АНПА, оборудованных солнечными панелями (SAUV), использование которых обеспечивает долгосрочное функционирование аппаратов за счет подзарядки каждого из них при нахождении на поверхности. Все аппараты оснащены системами акустической связи, обеспечивающими определение дистанций между ними. Предложено несколько конфигураций работы группы. В одной из них два аппарата движутся по поверхности и обеспечивают определение местоположения группы АНПА на основе взаимной дальномерной информации, во второй – один АНПА обеспечивает определение местоположения группы подводных аппаратов, выполняющих работу в толще воды. Предполагается, что местоположение АНПА, движущегося по поверхности, определяется с достаточной точностью с помощью GPS (или DGPS). Для оценивания местоположения АНПА сравниваются алгоритмы, построенные на основе фильтра Калмана и фильтра частиц (ФЧ).

В [14] рассмотрена ситуация, при которой часть подводных аппаратов из группы находится в зоне акустической тени маяков ГАНС ДБ и не слышит сигналов от некоторых из них, но получает сигналы от АНПА из группы, которые определяют свое местоположение с помощью РД ГАНС.

В настоящей работе предложен метод групповой навигации АНПА при обслуживании сети донных сенсорных узлов, позволяющий не применять штатные гидроакустические маяки и дорогостоящие опорные подводные аппараты, оснащенные высокоточными навигационными системами. Предполагается, что координаты узлов сенсорной сети определены в процессе их установки с необходимой точностью. АНПА необходимо попасть в зону действия визуальной навигации, которая составляет около 10 метров, для сближения с узлом сети и стыковки. В этой зоне обеспечивается его позиционирование с субметровой точностью и посадка на доковое устройство узла сенсорной сети. (Один из методов приведения АНПА к стыковочному модулю донной станции из зоны ее визуальной видимости, который предполагает выделение связанных с ней эталонных ориентиров, описан в [15].)

Предлагаемая вниманию читателей статья имеет следующую структуру. В разделе 2 приведено описание упомянутого метода обслуживания сети донных сенсорных узлов. В разделе 3 рассмотрена структура навигационной системы однотипных АНПА, входящих в группу. В разделе 4 анализируется работа ГАНС ДБ в разностно-дальномерном режиме при обслуживании автономной сети донных сенсорных узлов с помощью группы АНПА. Алгоритмы оценивания положения группы подводных аппаратов с использованием разностно-дальномерного режима работы ГАНС ДБ рассматриваются в разделе 5. В 6-м разделе приводятся некоторые результаты модельных и натурных испытаний элементов системы оценивания местоположения АНПА с применением РД ГАНС.

2. Описание метода

Предлагаемый метод обеспечивает обслуживание сети донных сенсорных узлов с помощью группы АНПА без использования штатных маяков ГАНС ДБ и надводных средств. Основная идея метода заключается в применении подводных аппаратов, состыкованных с узлами сенсорной сети, в качестве стационарных маяков РД ГАНС для других движущихся АНПА.

На рис. 1 показан сценарий долгосрочного подводного развертывания средств, которые содержат заданный набор установленных на дне автономных сенсорных узлов, образующих сеть донных сенсорных станций (ДСС). В этом сценарии АНПА может последовательно состыковаться с рядом ДСС для сбора накопленных в них данных и перезарядки их батарей, чтобы обеспечить их достаточным количеством энергии до следующего посещения. Предполагается, что зарядка собственной батареи аппарата осуществляется при посещении им подводной базовой станции, которая также является местом сбора и передачи потребителям накопленной информации. Навигационное обеспечение мобильных подводных аппаратов в процессе посещения узлов сети ДСС реализовано за счет использования состыкованных с ДСС стационарных однородных недорогих АНПА в качестве временных маяков РД ГАНС.

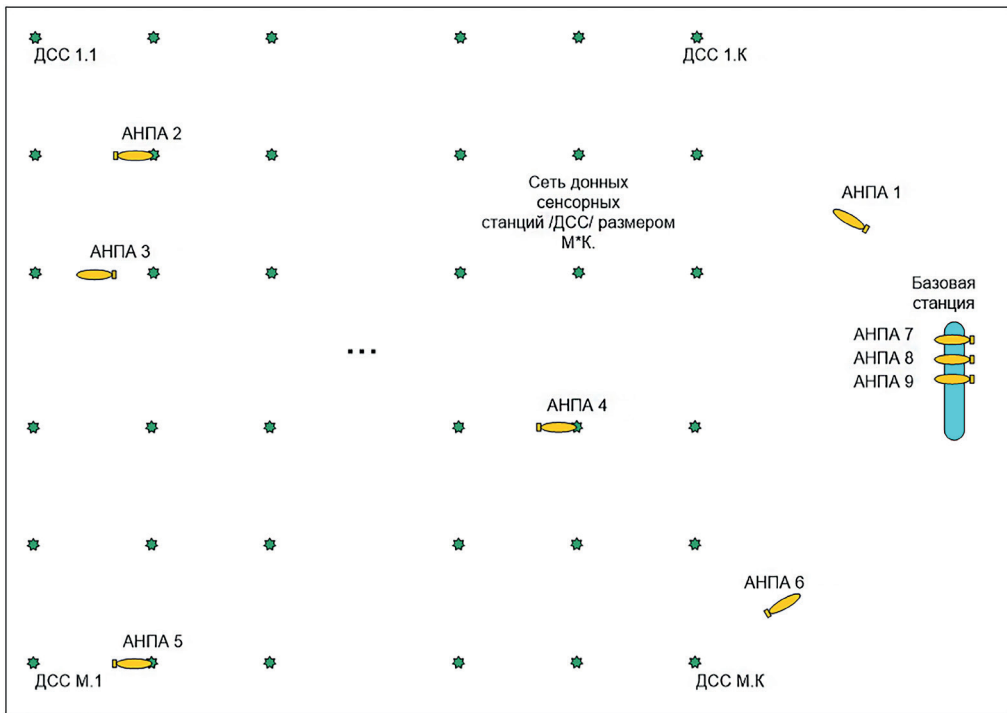


Рис. 1. Сеть донных сенсорных станций и группа АНПА для их обслуживания и сбора информации, а также базовая доковая станция

На рис. 1 показаны стационарные АНПА 2, 4 и 5, состыкованные с ДСС и служащие маяками, мобильные АНПА 1, 3 и 6, совершающие переходы к следующим ДСС, которые заданы у них в маршрутной программе, а кроме того, АНПА 7, 8 и 9, которые передают на базовую станцию собранную информацию и подзаряжают свои аккумуляторные батареи для следующего цикла обхода предназначенных для них ДСС.

На начальном этапе запуска всей системы выполняется размещение узлов сети ДСС и устанавливается базовая станция для АНПА в указанном районе морского дна. Затем определяется местоположение узлов сети ДСС и базовой станции с требуемой точностью. После этого с помощью обеспечивающего судна производится размещение и инициализация работы группы АНПА, включая навигационное обеспечение. Завершением предварительного этапа является достижение тремя или более подводными аппаратами узлов сети ДСС.

После выполнения предварительного этапа система переходит в штатный режим работы. При этом процедура обслуживания подводными аппаратами сети ДСС включает следующие этапы (см. рис. 1):

- движущиеся АНПА 1, 3 и 6 выполняют перемещения к следующим целевым ДСС и определяют свое местоположение на основе совместной обработки информации от бортовых систем счисления пути (ССП) и РД ГАНС, в которой, в зависимости от более благоприятной геометрии в смысле минимизации погрешности, стационарными маяками могут служить АНПА 2, 4, 5 или один из АНПА на базовой станции;
- после того как АНПА 1, 3 или 6 состыковался с очередной ДСС из своего задания, он посылает сообщение об этом на базовую станцию – для нормального функционирования данного метода навигации в каждый момент времени должно быть не менее трех АНПА, выполняющих роль стационарных маяков РД ГАНС;
- АНПА 2, 4 и 5 после завершения задач, связанных со считыванием сенсорной информации, накопленной между их посещениями данной ДСС, и подзарядки аккумулятора ДСС сообщают об этом на базовую станцию;
- если на текущий момент имеется не менее трех других АНПА, выполняющих функцию стационарных маяков РД ГАНС, то базовая станция дает разрешение аппарату, который раньше всех подал сигнал об окончании обслуживания текущего узла ДСС, перемещаться к следующему узлу ДСС в соответствии с его текущим маршрутом.

В дальнейшем обеспечивающее судно и другие вспомогательные надводные средства используются только для проведения профилактических работ с элементами сети ДСС и периодического обслуживания группы АНПА, включая базовую станцию.

3. Структура навигационной системы АНПА из группы

В состав навигационной системы (НС) однотипного АНПА из группы входят элементы бортовой системы счисления пути и ГАНС ДБ. Функциональная блок-схема НС подводного аппарата показана на рис. 2.

Бортовая система счисления пути включает абсолютный датчик скорости (доплеровский лаг) и датчики углового положения (курса, крена и дифферента). На основе их показаний рассчитывается позиция АНПА в горизонтальной плоскости. Его вертикальное положение формируется с требуемой точностью с использованием данных датчика давления.

В бортовой состав АНПА входят элементы ГАНС ДБ – акустическая антенна и устройство обработки сигналов. Указанное оборудование предназначено для фиксации моментов прихода сигналов от стационарных АНПА из группы, которые временно выполняют функцию маяков. Устройство обработки сигналов использует информацию от датчиков температуры и солености для оценки скорости распространения звукового сигнала в воде.

Данные системы счисления пути и элементов бортовой системы ГАНС ДБ учитываются при оценивании местоположения АНПА. Алгоритмы оценивания координат подводного аппарата рассмотрены в разделе 5. Сформированные оценки текущего местоположения АНПА передаются в систему программного управления (СПУ) подводного аппарата. На их основе выполняется коррекция параметров движения

АНПА в соответствии с заданной программной траекторией. Оценки текущего местоположения АНПА передаются в систему счисления координат для коррекции ее показаний, а также направляются в бортовой блок ГАНС ДБ для отбраковки аномальных измерений временных задержек.

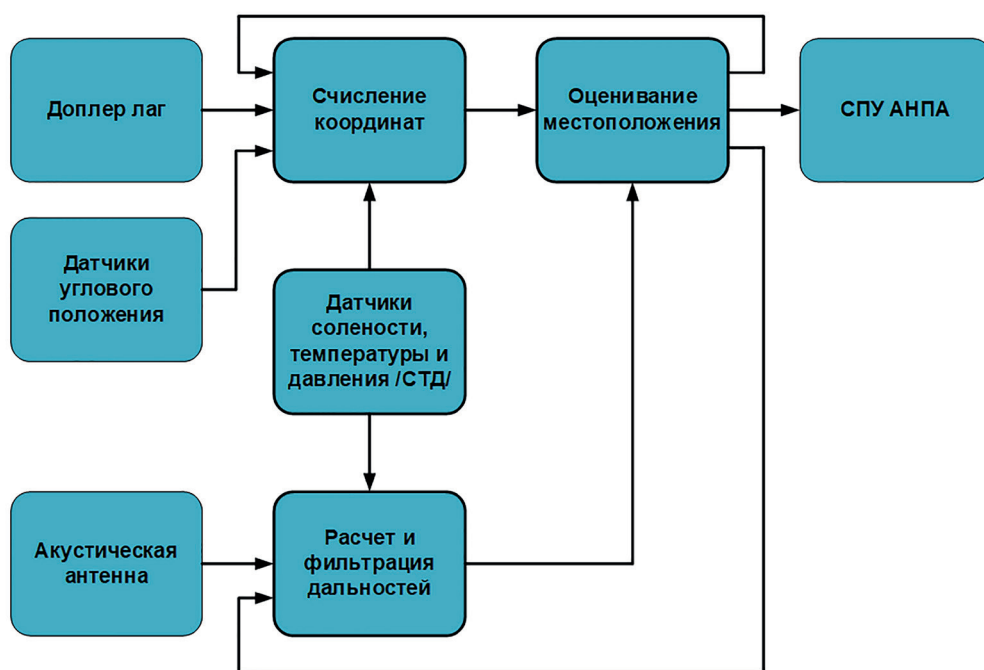


Рис. 2. Функциональная блок-схема НС АНПА

В настоящее время имеется достаточно широкий набор конкретных датчиков от разных производителей, от среднеточных до высокоточных, входящих в состав навигационной системы АНПА. Их выбор зависит от требуемой точности навигации подводного аппарата.

4. Описание работы ГАНС ДБ в разностно-дальномерном режиме при обслуживании автономной сети ДСС с помощью группы АНПА

В этой работе рассмотрена задача, в которой для всех АНПА из группы, выполняющих движение к узлам сенсорной сети из дальней зоны, требуется обеспечить определение их местоположения с заданной точностью для выхода в зону действия визуальной навигации вблизи целевых сенсорных узлов. Как уже говорилось выше, для обеспечения навигации группы АНПА, выполняющих движение к узлам сенсорной сети, предложено использовать ГАНС ДБ, функционирующую в разностно-дальномерном режиме. Временными маяками в ней являются состыкованные с узлами сенсорной сети стационарные АНПА, местоположение которых определено с требуемой точностью.

Предполагается, что АНПА, входящие в группу, не оснащены дорогостоящими системами точного времени и их бортовые часы не синхронизированы. Чтобы ГАНС ДБ действовала в РД-режиме необходимо наличие не менее трех стационарных

АНПА, функционирующих специальным образом. Один из стационарных АНПА является ведущим, инициирует очередной такт работы навигационной системы и излучает навигационный пакет с данными о своем состоянии и местоположении. Второй и третий стационарные аппараты являются ведомыми. Они и все движущиеся АНПА группы принимают навигационный пакет от ведущего подводного аппарата и фиксируют время его прихода. Ведомые стационарные АНПА при получении запроса от ведущего подводного аппарата излучают собственные навигационные пакеты, в которых передают информацию о своем состоянии и местоположении. Задержка по времени между приемом и излучением сигнала ведомыми подводными аппаратами в каждой конкретной реализации навигационной системы зависит от нескольких факторов, в том числе от типов используемых акустических модемов. 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 стационарных, а также получают их координаты. В процессе работы группы АНПА число стационарных подводных аппаратов может быть больше трех. Выбор стационарных АНПА в качестве опорных точек выполняется автоматически центром управления на базовой станции и основывается на геометрии их расположения, которая должна обеспечивать наибольшую точность навигации.

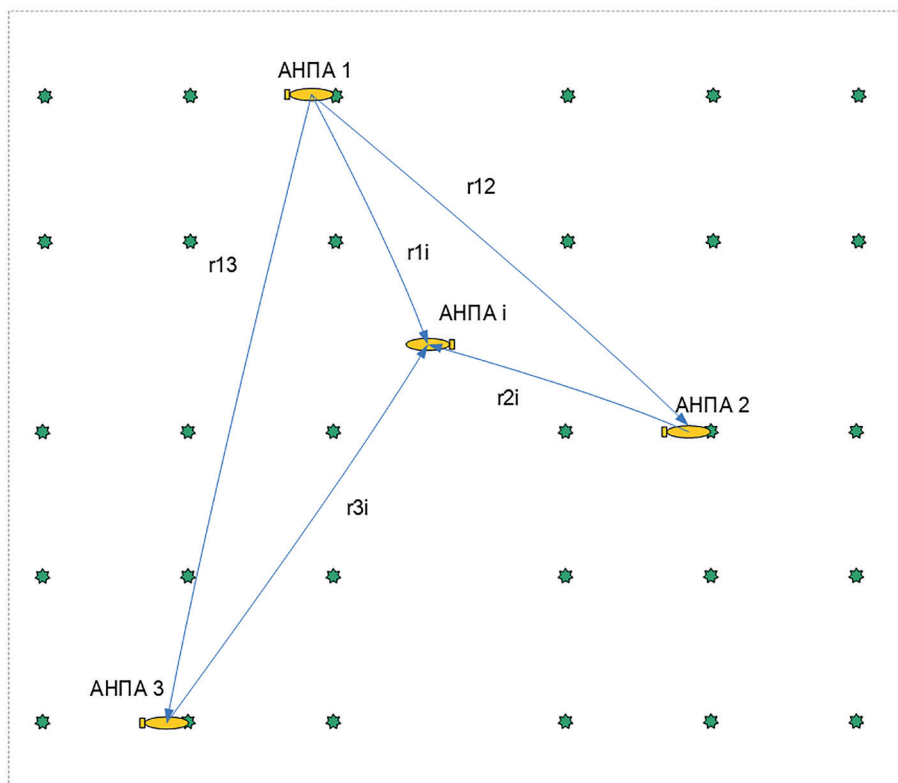


Рис. 3. Пути распространения сигналов от ведущего АНПА₁ к ведомым АНПА₂ и АНПА₃ и одному из движущихся АНПА_i

Рассмотрим положение группы АНПА в системе координат, связанной с базовой станцией, в которой оси Ox , Oy и Oz направлены соответственно на север, восток и вертикально вниз. На рис. 3 показаны пути распространения сигналов и даль-

ности от ведущего АНПА₁ к ведомым АНПА₂ и АНПА₃ (соответственно r_{12} и r_{13}) и r_{1i} – одному из движущихся АНПА_{*p*}, местоположение которого (x_p, y_p) необходимо определить. Дальности между АНПА₂, АНПА₃ и АНПА_{*i*} обозначены r_{2i} и r_{3i} соответственно. Предположим, что время распространения сигнала от ведущего АНПА₁ к АНПА_{*i*} равно T_{1i} , от ведущего АНПА₁ к ведомым АНПА₂ и АНПА₃ – T_{12} и T_{13} , от ведомых маяков АНПА₂ и АНПА₃ к АНПА_{*i*} – T_{2i} и T_{3i} .

В связи с тем, что часы на всех АНПА группы не синхронизированы и на АНПА_{*i*} не известно время, когда был отправлен сигнал ведущим АНПА₁, на АНПА_{*i*} можно измерить только разницу во времени прихода сигнала между АНПА₂, АНПА₃ и АНПА₁. Для T_{12i} – разности времени прихода сигналов к АНПА_{*i*} между АНПА₁ и АНПА₂ и T_{13i} – разности времени прихода сигналов к АНПА_{*i*} между АНПА₁ и АНПА₃ получаем:

$$T_{12i} = T_{2i} - T_{1i}, \quad T_{13i} = T_{3i} - T_{1i}. \quad (1)$$

Время распространения сигналов к АНПА_{*i*} от АНПА₁, АНПА₂ и АНПА₃ с момента излучения сигнала ведущим аппаратом связано с координатами АНПА₁, АНПА₂, АНПА₃ и АНПА_{*i*} соотношениями:

$$\begin{aligned} T_{1i} &= [((\mathbf{x}_{A1} - \mathbf{x}_i)(\mathbf{x}_{A1} - \mathbf{x}_i)^T)^{0.5}] / c, \\ T_{2i} &= [((\mathbf{x}_{A2} - \mathbf{x}_i)(\mathbf{x}_{A2} - \mathbf{x}_i)^T)^{0.5} + ((\mathbf{x}_{A2} - \mathbf{x}_{A1})(\mathbf{x}_{A2} - \mathbf{x}_{A1})^T)^{0.5}] / c, \\ T_{3i} &= [((\mathbf{x}_{A3} - \mathbf{x}_i)(\mathbf{x}_{A3} - \mathbf{x}_i)^T)^{0.5} + ((\mathbf{x}_{A3} - \mathbf{x}_{A1})(\mathbf{x}_{A3} - \mathbf{x}_{A1})^T)^{0.5}] / c, \end{aligned} \quad (2)$$

где c – скорость распространения звукового сигнала в воде, $\mathbf{x}_{A1} = (x_{A1}, y_{A1}, z_{A1})^T$, $\mathbf{x}_{A2} = (x_{A2}, y_{A2}, z_{A2})^T$, $\mathbf{x}_{A3} = (x_{A3}, y_{A3}, z_{A3})^T$ и $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ – координаты АНПА₁, АНПА₂, АНПА₃ и одного из движущихся АНПА_{*p*}, местоположение которого необходимо определить. Предполагается, что глубины расположения аппаратов $\mathbf{z}_{A1}$, $\mathbf{z}_{A2}$, $\mathbf{z}_{A3}$ и $\mathbf{z}_i$ измеряются с требуемой точностью бортовыми датчиками давления.

5. Алгоритмы оценивания положения АНПА из группы с использованием разностно-дальномерного режима работы ГАНС ДБ

С учетом того что вертикальная координата измеряется с требуемой точностью, для простоты изложения предположим, что АНПА движется в горизонтальной плоскости. В начальный момент времени $t = 0$ аппарат находится на своем посадочном месте на базовой станции и его координаты известны с требуемой точностью. Координаты подводного аппарата связаны со значениями модуля скорости $v(t)$ и курса $\varphi(t)$ кинематическими уравнениями:

$$\dot{x}(t) = v(t)\cos(\varphi(t)), \quad \dot{y}(t) = v(t)\sin(\varphi(t)). \quad (3)$$

Задача заключается в получении оценок местоположения АНПА при условии, что измерения времени и скорости распространения гидроакустических сигналов в уравнении (2), а также измерения скорости и курса движения АНПА в уравнениях (3) содержат ошибки, которые полагаются случайными.

Для построения навигационных алгоритмов в настоящее время широко используются различные варианты фильтра Калмана, см., например, [16–17] или [18–19].

С помощью расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filtering – EKF) выполняется линеаризация путем разложения нелинейной функции в уравнениях измерений в ряд, что решает проблему фильтрации в системах с незначительной нелинейностью. При этом точность фильтрации значительно снижается в случае, когда нелинейность высока. Ансентный фильтр Калмана (Unscented Kalman Filter – UKF) предназначен для решения проблемы оценивания местоположения для нелинейной системы с меньшей погрешностью с помощью ансентного преобразования (unscented transform – UT), поскольку обеспечивает более точную оценку состояния системы. Но в ситуации, когда система является нелинейной, а шумы – негауссовские, что приводит в частности к многоэкстремальности апостериорной плотности, процесс оценивания может стать неустойчивым и расходиться.

В последнее время для оценивания местоположения мобильных объектов, в том числе и АНПА, все шире используются варианты фильтра частиц (ФЧ) [20–28]. Алгоритм на его основе работоспособен в нелинейных и негауссовских средах. Рассмотрим ФЧ применительно к данной задаче.

Блок-схема алгоритма оценивания местоположения мобильного АНПА из группы на основе ФЧ в обобщенном виде приведена на рис. 4. При очередном обходе донных сенсоров по заданному маршруту координаты точки старта АНПА совпадают с координатами базовой донной станции и центр облака частиц располагается в указанной точке. Одним из основных параметров ФЧ является число N используемых частиц. Начальное распределение частиц задается в зависимости от априорной информации о местоположении мобильного АНПА. Увеличение числа частиц позволяет точнее оценивать местоположение АНПА, но при этом возрастают требования к производительности бортовой вычислительной системы. Основным параметром каждой частицы – ее вес, который определяет вероятность того, что ее координаты совпадают с координатами АНПА. Полагается, что в начальный момент времени частицы распределены равномерно в заданной области определенного радиуса, а вес их всех p_i одинаков и равен $1/N$.

В промежутках времени между моментами получения навигационных сигналов от РД ГАНС осуществляется счисление координат АНПА. Перемещение АНПА рассчитывается бортовой системой счисления пути на основе данных доплеровского лага и датчика курса. Предположим, что углы дифферента и крена малы и ими можно пренебречь. Каждая частица представляет собой модель АНПА и, таким образом, движется как АНПА. Так как счисление местоположения происходит с погрешностями, то возрастает и погрешность определения местоположения.

Введем следующие обозначения: $\hat{X}_{k-1} = [\hat{x}_{k-1}, \hat{y}_{k-1}]^T$ – полученная на $(k-1)$ -м шаге работы РД ГАНС оценка вектора состояния, ΔX_k – счисленный вектор перемещения АНПА, а $\tilde{X}_k$ – обновленный (предсказанный) вектор состояния. К моменту времени t_k получения подводным аппаратом k -го навигационного сигнала от РД ГАНС счисленное перемещение АНПА $\Delta X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k]^T$ определяется в соответствии со следующими выражениями:

$$\Delta x_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} [\tilde{v}(t)] \cos[\tilde{\varphi}(t)] dt, \Delta y_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} [\tilde{v}(t)] \sin[\tilde{\varphi}(t)] dt, \quad (4)$$

где $\tilde{v}(t)$ и $\tilde{\varphi}(t)$ – измеренные с погрешностями $\Delta\varphi$ и Δv значения курса и скорости. Предполагается, что погрешности измерения курса и скорости движения подводно-

го аппарата, а также времени и скорости распространения гидроакустического сигнала являются независимыми, с известными плотностями распределения, необязательно гауссовскими.

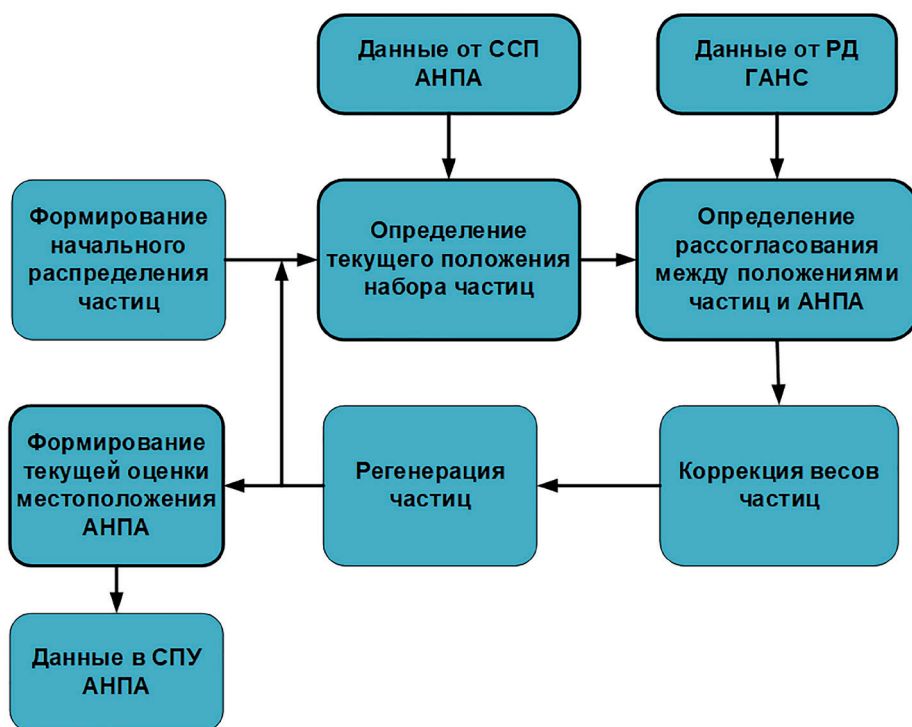


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оценивания местоположения мобильного АНПА из группы на основе ФЧ

На этапе экстраполяции работы ФЧ выполняется расчет предсказываемого вектора состояния $\tilde{X}_k$. Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки $\hat{X}_{k-1}$, а также численный вектор перемещения АНПА ΔX_k . Пересчет производится в соответствии с выражением

$$\tilde{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta X_k. \quad (5)$$

На этапе коррекции, после измерения на k -м шаге работы РД ГАНС разности времени прихода сигналов к мобильному подводному аппарату от трех стационарных АНПА, рассчитываются разности времени прихода сигналов t_{12pi} и t_{13pi} для всех частиц от трех стационарных АНПА в соответствии с выражениями (2), где вместо координат мобильного АНПА используются координаты частиц.

Далее выполняется коррекция весов частиц (например, как в [20]), соотношения для которых зависят от характера погрешностей используемых измерителей. После этого новые полученные веса частиц p_i нормализуются в соответствии с условием $\sum_{i=1}^N p_i = 1$. Затем по мере необходимости может выполняться регенерация частиц. В процессе работы ФЧ 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.

Оценка местоположения подводного аппарата на k -м шаге работы РД ГАНС формируется либо на основе координат частицы с максимальным весом, превышающим заданный порог, либо посредством вычисления среднего взвешенного значения координат всех частиц (x_{ki}, y_{ki}) в соответствии с выражением

$$\hat{x}(t_k) = \sum_{i=1}^N x_{ki} \cdot p_i, \quad \hat{y}(t_k) = \sum_{i=1}^N y_{ki} \cdot p_i. \quad (6)$$

Для оценки точности полученного решения на k -м шаге работы алгоритма можно использовать ковариационную матрицу Q_k , которая рассчитывается для имеющегося облака частиц $X_{ki} = (x_{ki}, y_{ki})$ в соответствии с выражением

$$Q_k = \sum_{i=1}^N p_i (X_{ki} - \hat{X}_k)(X_{ki} - \hat{X}_k)^T. \quad (7)$$

Матрица Q_k характеризует степень разброса облака частиц относительно полученной оценки местоположения подводного аппарата.

6. Некоторые результаты модельных и натурных испытаний элементов системы оценивания местоположения АНПА с использованием РД ГАНС

Для проверки работоспособности алгоритма оценивания местоположения АНПА на основе ФЧ при использовании трех стационарных маяков РД ГАНС была выполнена серия модельных экспериментов, некоторые результаты которых приведены в [28]. Рассматривается расположение гидроакустических маяков в вершинах равнобедренного треугольника со сторонами 2,9, 2,9 и 3,0 км. Исследованы ситуации с различными параметрами движения, случайными погрешностями и расположением траекторий движения внутри, на границе и за пределами треугольника с гидроакустическими маяками. Моделирование выполнялось методом Монте-Карло, при этом каждый эксперимент выполнялся циклами по 100 раз с разными случайными погрешностями, и на основе полученных результатов рассчитывались среднее значение и дисперсия.

Ошибка ССП за 4 часа работы АНПА составляла около 150 м из-за погрешностей измерения скорости и курса. При этом максимальная погрешность определения местоположения с использованием алгоритма на основе ФЧ не превышала 2 м, среднее значение погрешности составляло не более 0,25 м, а ее среднеквадратическое отклонение – не более 0,75 м.

В акватории залива Петра Великого Японского моря были проведены предварительные натурные эксперименты с целью проверки работы алгоритмов навигации группы АНПА на основе использования РД ГАНС. Некоторые результаты приведены в [29]. На рис. 5 изображена схема расположения элементов маяковой базы, которая включала в себя три маяка.

В ходе эксперимента имитатор АНПА (надувная лодка с соответствующим оборудованием) двигался внутри образованного маяками треугольника. Координаты точек постановки маяков и имитатора АНПА в ходе эксперимента определялись при

помощи высокоточного приемника спутниковой навигации, работающего в режиме кинематики реального времени и получающего дифференциальные поправки от развернутой на берегу базовой станции.

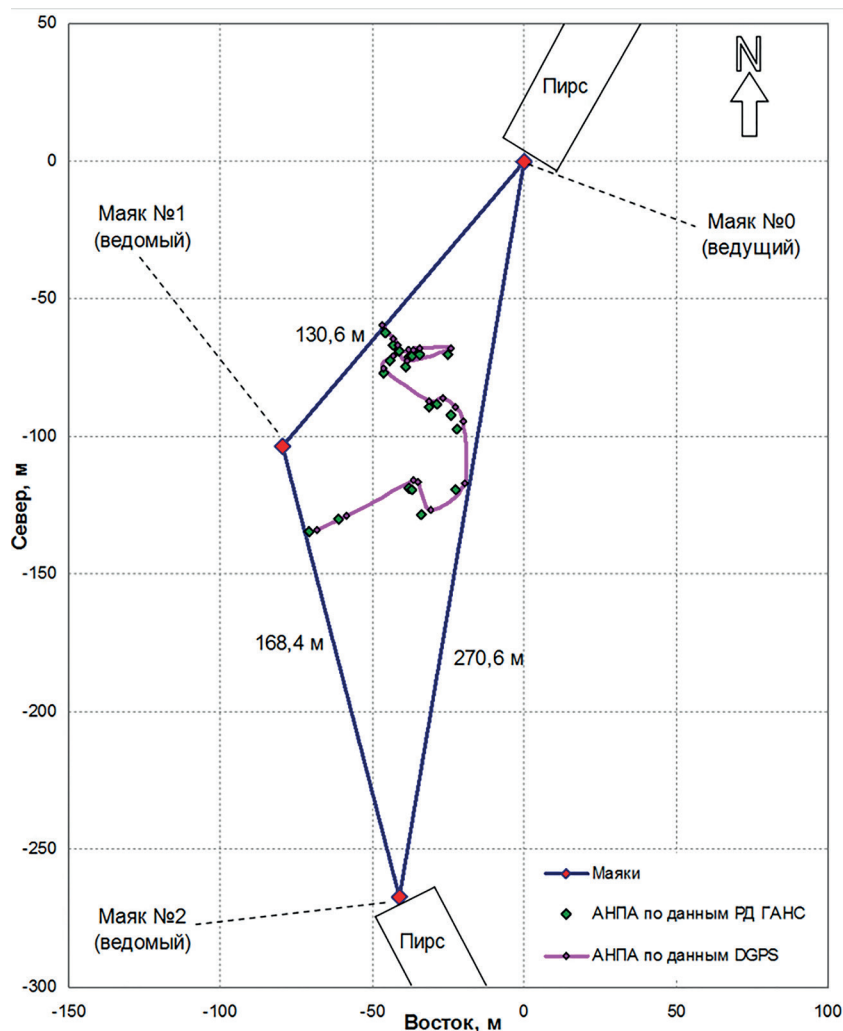


Рис. 5. Траектория движения мобильного модема (имитатора АНПА) по данным DGPS и его местоположение, рассчитанное на основе измеренных разностей моментов прихода сигналов от маяков (РД ГАНС)

На основе полученных данных был выполнен расчет координат точек нахождения имитатора АНПА разностно-дальномерным методом и произведено их сравнение с координатами, полученными от высокоточного приемника DGPS. На рис. 6 представлен график изменения во времени расстояния между точками местонахождения имитатора АНПА, полученный на основе данных РД ГАНС и приемника спутниковой навигации DGPS.

В результате натурных испытаний проверено программное обеспечение, реализующее разработанные навигационные алгоритмы, и в морских условиях исследована точность навигации на основе РД ГАНС.

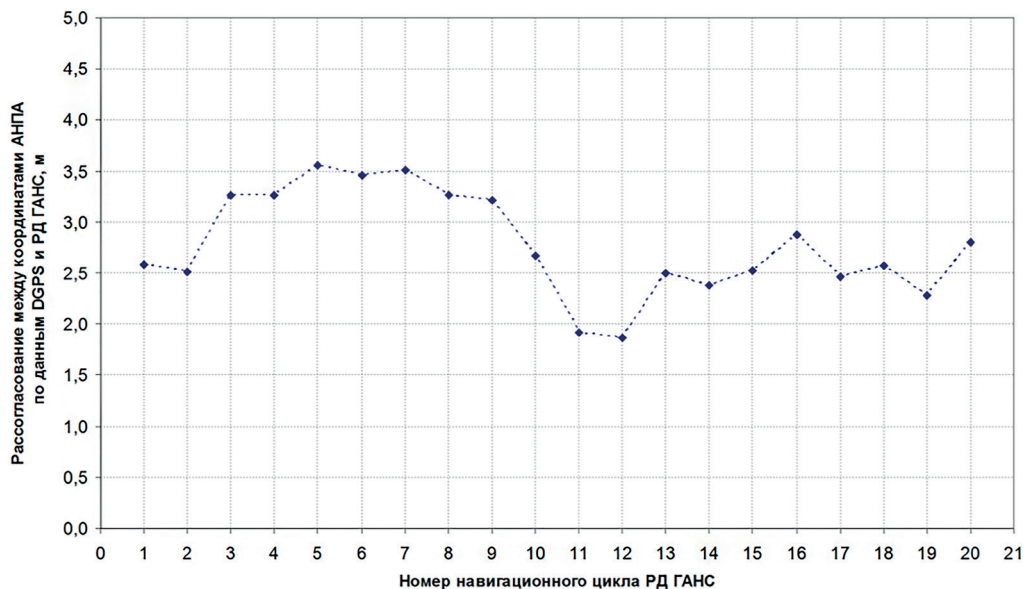


Рис. 6. Расстояния между точками местонахождения имитатора АНПА, полученными на основе данных РД ГАНС и приемника спутниковой навигации DGPS

7. Заключение

В статье описывается новый метод навигации для обеспечения групповой работы АНПА при обслуживании автономной сети донных сенсорных станций. Одной из основных особенностей метода является то, что в нем не используются штатные маяки ГАНС ДБ и надводные средства. Метод позволяет быстро и с наименьшими затратами выполнять с помощью группы АНПА операции по обслуживанию автономных донных сенсорных сетей, а также с использованием РД ГАНС обеспечить устойчивое позиционирование с требуемой точностью всех АНПА в группе. Кроме того, метод работоспособен в акваториях, покрытых льдом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Farr, N, Collins, J., at al.**, Wireless Retrieval of High-Rate Ocean Bottom Seismograph Data and Time Synchronization Using the WHOI Optical Modem and REMUS AUV, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, 2019, MTS/IEEE Seattle, USA.
2. **Родионов А.Ю., Щербатюк А.Ф.** Перспективы использования оптических систем связи и ориентации в подводной робототехнике // *Подводные исследования и робототехника*. 2021, no.4, pp. 37–49.
3. **Thompson, J. at 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.
4. **Pessoa, L., Duarte, C., Salgado, H., Correia, V., Ferreira, B., Cruz, N., Matos, A.**, Design of an underwater sensor network perpetually powered from AUVs, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, 2019, MTS/IEEE, Marseille, France.
5. **Maki, T., Matsuda, T., Sakamaki, T., Ura, T., Kojima, J.**, Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning with a Single Seafloor Station, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, vol. 38, pp. 167–177.
6. **Matsuda, T., Maki, T., Sato, Y., and Sakamaki, T.**, Experimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, vol. 43, no. 2, pp. 1–23.

7. Caiti, A., Calabrò, V., Fabbri, T., Fenucci, D., Munafò, A., Underwater communication and distributed localization of AUV teams, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, Bergen, 2013, pp. 1–8.
8. Sergeenko, N., Scherbatyuk, A., Dubrovin, F., Some Algorithms of Cooperative AUV Navigation with Mobile Surface Beacon, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, San-Diego, USA, 2013, pp. 1–6.
9. Gao, R., Chitre, M., Cooperative Positioning using Range- Only Measurements Between Two AUVs, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, Sydney, NSW, Australia, 2010, pp. 1–6.
10. Baccou, P., Jouvenel, B., Creuze, V., Rabaud, C., Cooperative Positioning and Navigation for Multiple AUV Operations, *Proceedings of the MTS/IEEE International Conference OCEANS*, 2001, vol. 3, pp. 1816–1821.
11. Vaganay, J., Leonard, J., Curcio, J., Willcox, S., Experimental Validation of the Moving Long Base Line Navigation Concept, *Proceedings of the IEEE International Conference AUV*, 2004, pp. 1–7.
12. Zhang, L., Xu, D., Liu, M., Yan, W., Gao, J., An Algorithm for Cooperative Navigation of Multiple UUVs, *Proc. of the Sixth Int. Symposium on Underwater Technology*, Wuxi, China, April 2009, pp. 1–6.
13. Mirabelot, D., Sandersont, A., Blidberg, D., Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation, *Proc. of the Int. Conf. UUST*, NH, USA, 2007, pp. 1–6.
14. Dubrovin, F., Scherbatyuk, A., Scherbatyuk, D., Rodionov, A., Vaulin, Yu., Navigation for AUV, Located in the Shadow Area of LBL, During the Group Operations, *Proceedings of the MTS/IEEE Conference OCEANS*, 2020, Singapore-U.S., Gulf Coast.
15. Щербатюк А.Ф., Воронцов А.В., Кушнерик А.А. и др. Алгоритмы обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2010. №1. С. 29–39.
16. Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В. Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть 1. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №3 (114). С. 3–33.
17. Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В. Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть 2. Примеры решения задач // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №4 (115). С. 56–77.
18. Wan, E. and Merwe, R., The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, *Proceedings of the IEEE Symposium «Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control»*, 2000.
19. Julier, S.J., Uhlmann, J.K., Unscented Filtering and Nonlinear Estimation, *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 3, pp. 401–422.
20. Gustafsson, F., Gunnarsson, F., Bergman, N., et al., Particle filters for positioning, navigation, and tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 2, pp. 425–437.
21. Степанов О.А., Торопов А.Б. Использование последовательных методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 10. С. 49–54.
22. Степанов О.А., Торопов А.Б. Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3324–3337.
23. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов однопаяковой мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. №4. С. 47–52.
24. Рыбаков К.А. Решение нелинейных задач оценивания при обработке навигационных данных с использованием непрерывного фильтра частиц // Гироскопия и навигация. 2018. Том 26. №4 (103). С. 82–95.
25. Maurelli, F., Krupinski, S., A semantic-aided particle filter approach for AUV localization, *Proceedings of the MTS/IEEE Conference OCEANS*, 2018, Kobe, Japan.
26. Fei, X., Shen, Y., Yan, T., Application of AUV Navigation Based on Deterministic Particle Filter Algorithm, *Proceedings of the MTS/IEEE Conference OCEANS*, 2018, Charleston, USA.
27. Menna, B.V., Villar, S.A., Acosta, G.G., Particle filter based autonomous underwater vehicle navigation system aided thru acoustic communication ranging, *Proceedings of the MTS/IEEE Conference OCEANS*, 2020, San-Diego, USA.

28. Щербатюк Д.А. Алгоритм навигационного обеспечения работы группы АНПА на основе фильтра частиц и разностно-дальномерной гидроакустической системы // Подводные исследования и робототехника. 2021. №4. С. 50–59.
29. Dubrovin, F., Vaulin, Yu., Scherbatyuk, D., Scherbatyuk, A., Some results of preliminary natural experiments for algorithms of differential-ranging acoustic positioning system intended for AUV group navigation, *Proceedings of the XXVIIth International Conference on Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, 25–27 May, 2020.
-

Scherbatyuk, A.F. (Institute of Automation and Control Processes of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia)

Multiple AUV Navigation without Using Acoustic Beacons, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 106–121.

Abstract. Autonomous bottom sensor networks are increasingly used to collect various data near the sea bottom. Transmitting these large accumulated data arrays to the data collection and processing center is a pressing problem. A promising method to retrieve data from sensor nodes is to use multiple autonomous underwater vehicles (AUV). The quality of underwater mission performance is then determined by accurate navigation of each vehicle within the group. The article presents a new efficient method of multiple AUV navigation for performing the vital task – servicing the autonomous network of bottom sensor stations. The method requires neither beacons of long baseline acoustic navigation system (LBL ANS) nor surface vehicles. During the mission, some AUVs are moving to the target sensor nodes, while the others are docked to the sensor nodes, read out the accumulated data, and perform the maintenance procedures (battery recharging, state diagnostics, and correction of the mission program). The main idea of the method is that the AUVs docked to the sensor nodes function as temporary stationary beacons of the differential ranging (DR) ANS for the other moving AUVs. The algorithms of the proposed navigation method are considered.

Key words: Network of autonomous bottom sensors, multiple AUVs, long baseline acoustic navigation system (LBL ANS), differential ranging (DR) mode of LBL ANS.

Материал поступил 26.10.2022