

## О МЕТОДАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИИ ГРУПП АНПА: КРАТКИЙ ОБЗОР

**Ю.В. Ваулин<sup>1,2</sup>, Ф.С. Дубровин<sup>1</sup>,  
Д.А. Щербатюк<sup>1,2</sup>, А.Ф. Щербатюк<sup>1,2</sup>**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий<sup>1</sup>  
Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup>

Приведен обзор подходов, предназначенных для решения задач навигации групп АНПА. Даются описания методов навигации на основе асинхронных и синхронных ГАНС, раскрываются особенности таких методов применительно к группам АНПА. Рассмотрены современные подходы, в основе которых лежит идея организации информационного взаимодействия АНПА друг с другом с целью обеспечения навигации группы в целом. Отмечено, что одним из приоритетных является подход, предполагающий наличие в группе одного или нескольких АНПА, оснащенных полным комплектом навигационных датчиков с целью высокоточного определения их местоположения. Относительное положение остальных аппаратов в группе вычисляется на основе дальностей до выделенных АНПА. Обсуждены вопросы применения автономных необитаемых водных аппаратов, выполняющих функцию мобильных маяков, для навигации групп АНПА и алгоритмы формирования их траекторий для повышения точности навигации группы АНПА. Раскрываются достоинства и недостатки каждого из подходов.

### ВВЕДЕНИЕ

Автономные необитаемые подводные аппараты являются эффективным средством для решения широкого круга задач подводных исследований. В настоящее время большое значение придается использованию групп АНПА для выполнения масштабных и трудоемких работ, связанных с патрулированием и охраной морских акваторий, поиском и обследованием объектов, съемкой физических полей океана. При выполнении данного класса работ необходимо осуществлять одновременные измерения с помощью большого набора пространственно разнесенных датчиков. Кроме того, применение групп АНПА открывает возможности для решения новых задач, а также позволяет повысить эффективность выполнения уже привычных миссий по сравнению с использованием одиночного аппарата. В частности, использование групп АНПА обеспечивает более высокую надежность робототехнического комплекса в целом за счет введения некоторого 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).

Как правило, ценность получаемых при помощи АНПА данных существенно зависит от точности их навигационной привязки. Поэтому так же, как и в случае с одиночным АНПА, одной из важнейших задач, определяющих успешность и качество выполнения подводных миссий, является задача обеспечения требуемой точности навигации каждого АНПА из состава группы. Кроме того, в связи с одновременным присутствием под водой нескольких АНПА возникает задача обеспечения безопасного совместного маневрирования АНПА во избежание их столкновения друг с другом.

Эффективная групповая работа АНПА вообще и навигация в частности предполагает использование гидроакустических средств, являющихся едва ли не единственным инструментом для обеспечения информационного взаимодействия АНПА с внешним миром в широком диапазоне дальностей во время их нахождения под водой [1]. Привычные подходы, основанные на применении таких гидроакустических систем и традиционно используемые для навигации одного АНПА, не обеспечивают оперативности навигации для групп АНПА. В связи с этим в последнее

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел./факс: +7 (423) 243-24-16. E-mail: imtp@marine.febras.ru  
<sup>2</sup> 690000, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: +7 (423) 243-44-72.

время значительное внимание уделяется разработке методов и алгоритмов, предназначенных для решения задачи групповой навигации.

Данная работа представляет собой обзор подходов, предназначенных для решения задач навигации групп АНПА. В разделе 1 приводятся описания методов навигации групп АНПА на основе асинхронного подхода, традиционно используемых для навигации одиночных АНПА. Раздел 2 посвящен методам групповой навигации на основе синхронной ГАНС. В разделе 3 рассматривается система групповой навигации с использованием АНПА и разнородных типов аппаратов. В разделе 4 рассмотрены современные подходы, в основе которых лежит идея организации взаимодействия АНПА друг с другом с целью обеспечения навигации группы в целом.

### 1. Применение асинхронных ГАНС для обеспечения навигации групп АНПА

Одним из путей обеспечения навигации группы АНПА является применение для этой цели асинхронной гидроакустической навигационной системы с длинной базой (ГАНС ДБ) с донными маяками-ответчиками (МО). Принцип действия такой системы основан на опросе подводным аппаратом гидроакустических маяков и измерении времени, прошедшего от момента излучения сигнала-опроса до получения сигнала-ответа. Дальность действия каждого МО составляет обычно несколько километров (как правило, не более 10–15 км), поэтому при помощи такой системы АНПА способен определять свое местоположение в области, площадь которой может исчисляться десятками квадратных километров. Ошибка определения дальности между МО и АНПА может составлять от 0,01 % от измеряемой дальности для прецизионных до 0,1 % для низкоточных ГАНС ДБ.

Попытка применения данного подхода для навигации группы АНПА сталкивается с проблемой – каждому из АНПА, входящему в состав группы, необходимо периодически предоставлять возможность определения своего местоположения путем опроса сети маяков, что достигается временным разделением доступа к ним. Общий период обсервации такой системы навигации существенно зависит от числа АНПА, входящих в состав группы: чем больше число АНПА, тем реже каждому АНПА будет предоставляться временное окно для работы с маяками и тем ниже будет точность навигации в целом. Сложности в организации работы такой системы также возникают, когда появляется необходимость добавления

нового АНПА в состав группы либо удаления АНПА из состава группы, так как это требует изменения временной схемы работы системы.

Один из примеров использования асинхронной ГАНС ДБ для обеспечения навигации группы подводных аппаратов, разработанных в Институте проблем морских технологий ДВО РАН, описан в [2]. Представленный в данной работе подводный робототехнический комплекс (ПРК) предназначен для выполнения обзорно-поисковых работ на шельфе и состоит из двух АНПА и одного телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА). Гидроакустическая навигационная система ПРК позволяет работать двум подводным аппаратам в едином навигационном поле донных маяков-ответчиков (рис. 1). При организации группового запуска производится синхронизация внутренних часов двух подводных аппаратов и каждому из аппаратов выделяется свой слот времени для опроса маяков и для передачи данных измерений по акустическому каналу на пост управления. Измерение дистанций до маяков производится в режиме запрос–ответ. Каждый из маяков отвечает на собственной частоте. Величина слота времени на цикл опроса маяков и передачу данных телеметрии для каждого из аппаратов составляет 30 с. Общий период обсервации, таким образом, равен 60 с.

Особенностью работы ГАНС ПРК является то, что во время цикла обсервации одного аппарата второй аппарат осуществляет прием навигационных сигналов от первого АНПА и МО. Это позволяет измерять взаимные дистанции между аппаратами во время запуска и дает дополнительные возможности при реализации алгоритмов группового управления.

Еще одним распространенным способом обеспечения навигации группы АНПА является использование гидроакустических навигационных систем с ультракороткой базой (ГАНС УКБ). Оборудование подводного аппарата включает приемную антенную решетку и компьютер для обработки результатов измерений. При этом измеряется время распространения и разность фаз прихода сигналов на элементы приемной антенны. На основе полученных измерений оцениваются направление и дальность между маяком и АНПА. Наибольший вклад в неточность определения положения АНПА вносит ошибка определения пеленга на маяк. В высокоточных системах с УКБ ошибка в определении пеленга может составлять 0,2 градуса, что при дальности до маяка в 1 км дает ошибку в определении положения АНПА около 3,5 м. В УКБ системах средней точности ошибка в определении пеленга может составлять до 2 градусов, что при аналогичной дальности до маяка дает ошибку 35 м.

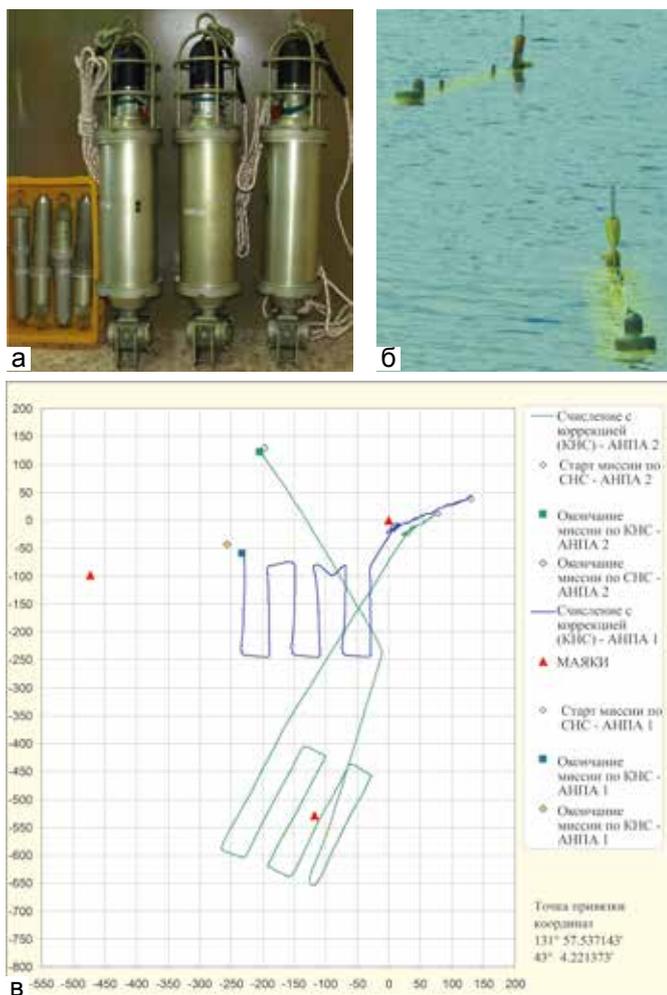


Рис. 1. Маяки ГАНС ДБ (а), АНПА из состава ПРК (б) и траектории аппаратов при совместном запуске (в)

В статье [3] предлагается метод навигации для подводных аппаратов относительно одной донной станции (ДС), с помощью которого подводные аппараты могут оценивать свои позиции и ориентации относительно ДС без необходимости дорогой инерциальной навигационной системы. При этом в процессе работы каждый подводный аппарат опрашивает ДС, которая вычисляет пеленг на аппарат и передает эту информацию обратно аппарату, который также измеряет дистанцию до ДС. Комбинируя эту информацию и вводя ее в нелинейную структуру фильтра, которая включает в себя измерения путевой скорости АНПА и другие навигационные параметры, АНПА вычисляет свое положение и оценки курса. 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 [4]. Алгоритм использует данные от ГАНС УКБ и основан на фильтре Калмана (ФК) с учетом особенностей организации сетевой связи.

## 2. Методы навигации групп АНПА с использованием синхронных ГАНС

Один из подходов, позволяющий организовать одновременную навигацию группы АНПА, основан на использовании синхронной ГАНС ДБ, работающей в сферическом режиме. При этом гидроакустические маяки периодически излучают сигналы, и измеряются времена их распространения до каждого АНПА в группе. Данные временные задержки преобразуются в дистанции на основе известных оценок значений эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде в районе работ. Этот подход требует, чтобы на всех узлах сети (маяках и АНПА) имелись синхронизированные часы, при помощи которых организуется определенный порядок работы гидроакустической навигационной сети [5]. Рассмотренный подход предполагает использование дорогостоящего оборудования, обеспечивающего синхронную работу часов на маяках и АНПА в течение всего запуска. В работе [6] рассмотрены вопросы синхронизации часов для групповой работы АНПА. В системе использованы модемы SeaModem, в которые были интегрированы атомные часы, предназначенные для минимизации типичного дрейфа часов реального времени, что обеспечивает точную оценку дальности в одном направлении во время долгосрочных миссий. Приводятся результаты успешных морских экспериментов.

Другим способом реализация синхронного режима работы гидроакустической навигационной сети является вариант без использования синхронизированных часов на АНПА (так называемая ГАНС ДБ в гиперболическом режиме и лежащий в ее основе разностно-дальномерный метод навигации) [7]. В рамках данного подхода синхронизированные часы должны быть только в составе навигационных маяков, работа которых также организуется по заранее утвержденному расписанию. АНПА, получая навигационные сигналы, должен однозначно идентифицировать маяк-отправитель (путем временного разнесения моментов излучения сигналов маяками либо использования различных сигналов для различных маяков), чтобы затем определить разности моментов приема сигналов от отдельных маяков. Знание координат точек постановки маяков и

измеренных разностей моментов приема сигналов от них позволяет определить местоположение АНПА.

Наиболее перспективным является подход, позволяющий реализовать аналогичный режим работы гидроакустической сети и при этом обойтись без установки синхронизированных часов также и на маяках. Например, в работах [8, 9] предложен метод обеспечения навигации для группы АНПА при помощи нескольких (трех или более) стационарных гидроакустических маяков с известным местоположением. Данный подход позволяет каждому из АНПА, входящему в состав группы, не только определять свое местоположение, но и оценивать координаты других АНПА. Кроме того, этот метод делает возможным внешнее отслеживание всех АНПА сторонним наблюдателем (например, с борта обеспечивающего судна). Описанный результат достигается за счет специально организованной работы навигационных маяков, формирующих гидроакустическую сеть. Один из маяков является ведущим, остальные – ведомыми. Ведущий маяк задает общий темп работы гидроакустической навигационной системы путем периодического излучения назначенного ему уникального сигнала. Ведомые маяки ожидают получения данного сигнала и после его приема с некоторой заранее определенной задержкой излучают свои уникальные сигналы. Любой АНПА, принявший данные сигналы от маяков и зафиксировавший моменты их получения, способен определить свое местоположение. Для этого АНПА должны быть известны координаты точек постановки маяков, временные задержки, с которыми ведомые маяки излучают свои сигналы в ответ на полученный сигнал от ведущего маяка, а также эффективная скорость распространения звуковых сигналов в воде в районе работ.

Для обеспечения возможности внешнего отслеживания всех АНПА сторонним наблюдателем (в том числе и оценивания любым АНПА координат других АНПА) в работе [9] предлагается дополнить описанную схему следующим образом: каждый АНПА при получении сигнала от любого из маяков излучает уникальный (назначенный именно этому АНПА) ответный сигнал. Авторы отмечают, что сторонний наблюдатель, фиксируя моменты прихода этих сигналов, способен однозначно определить координаты АНПА, если работа гидроакустической сети организована определенным образом. Требуется, чтобы временные задержки, с которыми ведомые маяки излучают свои сигналы в ответ на полученный сигнал от ведущего маяка, удовлетворяли определенному условию, зависящему от расстояния между ведомыми маяками.

В работе [10] рассмотрена задача обеспечения навигации групп АНПА при помощи разностно-дальномерной навигационной системы с длинной базой. Представлены два разработанных навигационных алгоритма, реализующих переборный и аналитический методы решения разностно-дальномерной задачи. Приведены полученные с помощью компьютерного моделирования результаты работы данных алгоритмов, подтверждающие их работоспособность и эффективность.

### **3. Системы групповой навигации, использующие автономные необитаемые водные аппараты**

Один из подходов организации групповой навигации, который нашел широкое распространение при выполнении реальных морских работ, основан на использовании автономных необитаемых водных аппаратов (АНВА) в качестве мобильных маяков. В работах [11–13] авторы развивают данный подход. Рассмотрены вопросы внедрения систем навигации, управления и контроля автономных подводных аппаратов в мобильных акустических сетях. Наряду с теоретическими исследованиями алгоритмов, необходимых для подобных операций, также представлены результаты моделирования и практических экспериментов, которые подтверждают работоспособность предложенных решений.

Вариант, когда для навигационного обеспечения группы АНПА используется один АНВА, рассмотрен в работах [14–16]. Приводятся результаты сравнения различных методов оценивания положения (фильтр Калмана, фильтр частиц, метод наименьших квадратов), анализируется наблюдаемость метода. С целью повышения точности навигации предлагается формировать траекторию АНВА специальным образом. Приводятся результаты модельных и натуральных экспериментов.

В работе [17] коллектив авторов решает несколько задач, связанных с обеспечением групповой навигации АНПА с помощью нескольких АНВА. Одна из них заключается в разработке алгоритма для осуществления совместной навигации децентрализованной группы аппаратов разного типа. Метод оценивания основан на использовании фильтра Калмана, для поддержания устойчивости и предотвращения расхождения которого предлагается дополнительный алгоритм чередующегося обновления. Также рассмотрена задача построения алгоритма,

который на основании координат, курса, скорости и ковариационной матрицы от АНПА будет управлять движением поверхностного аппарата таким образом, чтобы при каждом сеансе связи ошибка положения АНПА снижалась максимально возможно.

В статье [18] описана практическая реализация системы, в которой для навигации группы АНПА используется АНВА. Задача навигации решается на основе информации от системы счисления пути и данных о взаимном расстоянии. Рассмотрены два эксперимента. В одном из них навигация АНПА (Iver2) обеспечивается с помощью АНВА, который совершает круговые движения над АНПА. Во втором эксперименте сравнивается точность оценивания, полученная с использованием фильтра частиц, метода наименьших квадратов и фильтра Калмана. В эксперименте используются три маяка, два из которых играют роль АНПА. Эффективность групповой навигации сильно зависит от взаимного расположения маяков и АНПА. Для повышения точности оценивания АНПА траектория движения маяка должна планироваться соответствующим образом. В работе предложен алгоритм, который формирует оптимальное перемещение маяка.

В статье [19] рассмотрено использование модемов с синхронизированными часами для обеспечения связи и навигации группы АНПА. При этом местоположения АНПА оцениваются на основе ФК с использованием не только измерений дистанций, но и скорости изменения дистанций для каждого принимаемого акустического сигнала. В представленных результатах моделирования используется один АНВА и один АНПА. При этом АНПА оборудован доплеровским лагом, датчиками угловой ориентации и датчиком давления (глубины), а АНВА оснащен приемником GPS.

Использование полупогружной системы, представляющей собой разновидность АНВА, для отслеживания и контроля поведения группы АНПА описана в статье [20]. Выполнено тестирование отслеживания, позиционирования и связи нескольких АНПА с использованием данного АНВА. Результаты испытаний доказали эффективность использования разработанной системы.

Статьи [21, 22] посвящены вопросу навигации АНПА с помощью одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого АНВА (рис. 2).

Исследованы два алгоритма оценивания местоположения АНПА, использующие информацию о дальности до мобильного гидроакустического

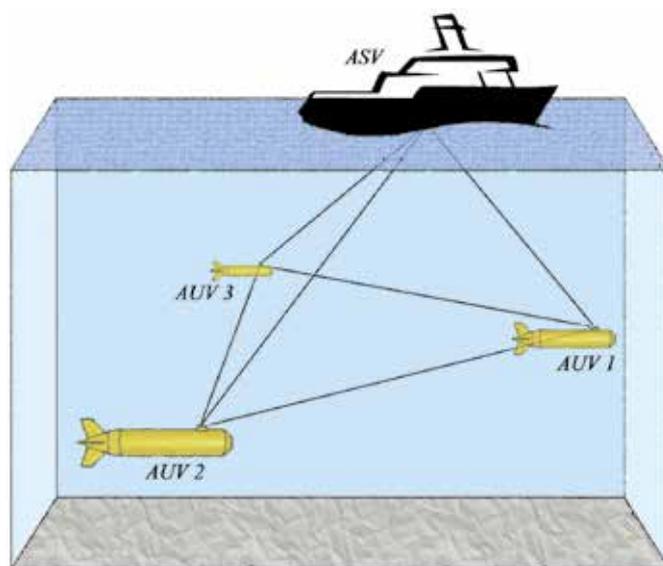


Рис. 2. Организация навигации нескольких АНПА с помощью одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого АНВА

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 испытаний с использованием морского робототехнического комплекса МАРК, включающего автономные необитаемые подводный и водный аппараты.

В статье [23] рассмотрен устойчивый к помехам принцип акустической связи для позиционирования и навигации группы подводных роботов в среде, в которой отсутствуют какие-либо ориентиры. С помощью акустических модемов и двух АНВА на поверхности, определяющих свое положение с помощью GPS, осуществляется навигация группы подводных роботов для выполнения различных заданий, связанных с инспектированием объектов и мониторингом среды. Подход был реализован с использованием АНПА Monsun и проверен в условиях мелководной бухты.

Вопросы формирования траектории мобильного маяка для повышения точности навигации группы АНПА рассмотрены в работах [24–27]. Алгоритм планирования пути мобильного маяка, описанный в работах [25, 26], основан на методе кросс-энтропии в рамках теории марковских процессов. Моделирование показало ограниченность ошибок оценивания местоположения при использовании разработанного подхода.

#### 4. Алгоритмы организации групповой навигации, основанные на использовании информации о дистанциях между АНПА внутри группы

В статье [28] описан подход, при котором для обеспечения навигации группы АНПА используются как измерения дальностей до мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого посредством АНПА, так и измерения дальностей между отдельными АНПА в группе. Алгоритм оценивания местоположения каждого АНПА в группе построен на основе ФК. Рассмотрен алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, позволяющий минимизировать ошибку определения местоположения для случая трех совместно работающих АНПА. Приведены некоторые результаты моделирования работы рассмотренных алгоритмов. Ситуация с двумя АНПА, когда первый из них оснащен высокоточной системой навигации, а второй – навигационной системой с низкой точностью, рассмотрена в статье [29]. Для повышения точности работы второго аппарата используется информация о дальностях между аппаратами. Для оценивания местоположения второго АНПА используется алгоритм на основе ФК. Приведены результаты модельных и натурных экспериментов.

Метод навигации группы АНПА без использования маяков рассмотрен в статье [30]. Имеется АНПА лидер, который определяет свое местоположение с высокой точностью. Остальные аппараты в группе определяют свое положение на основе счисления с использованием бортовых навигационных датчиков и уточняют его на основе данных о дальностях до аппарата лидера. В статье [31] описана ГАНС с мобильной базой. В данном случае несколько дорогих АНПА, оснащенных высокоточной навигационной системой, выполняют роль маяков для других более простых и дешевых АНПА. Описан эксперимент, в котором два исследовательских катера выполняют роль маяковой базы, а АНПА Bluefin 21 определяет свое местоположение. Аналогичная идея описана в работе [32], в которой в миссии участвовало два типа 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 аппаратов. При решении задачи было выполнено сравнение метода триангуляции с ФК, где фильтр Калмана показал более высокую точность оценивания местоположения подводных аппаратов.

В статье [33] рассмотрено навигационное обеспечение группы АНПА с солнечными панелями (SAUV), использование которых обеспечивает их долгосрочное функционирование за счет подзарядки каждого аппарата во время нахождения на поверхности. Все аппараты оснащены системами акустической связи, обеспечивающими определение дистанций между аппаратами. Предложено несколько конфигураций работы группы. В одной из них два аппарата двигаются по поверхности и обеспечивают коррекцию местоположения группы АНПА на основе взаимной дальномерной информации (рис. 3), а во втором случае один АНПА обеспечивает коррекцию 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 ФК и ФЧ.

В работе [34] рассмотрена задача оценивания взаимного положения разнородных подводных и водных аппаратов, работающих в группе. Работы выполнены в рамках европейского проекта GREX. Задача относительной навигации решается на основе информации от системы счисления пути и данных о взаимном расстоянии. Алгоритмы оценивания местоположения используют метод триангуляции и фильтр Калмана.

Проблема корректного использования навигационных данных для организации групповой навигации рассмотрена в статье [35]. В статье описываются мобильные системы ГАНС ДБ на основе нескольких АНПА с дорогими и точными бортовыми системами навигации, относительно которых другие АНПА



Рис. 3. Организация навигации группы АНПА при помощи двух аппаратов, оборудованных солнечными панелями (SAUV)

оценивают собственное местоположение путем измерения дальностей на основе метода трилатерации и с учетом данных измерений о взаимных пеленгах. Между аппаратами группы производится постоянный обмен данными измерений. Отмечается, что при использовании данного подхода возможны ситуации, когда одни и те же данные могут быть использованы более одного раза, что приведет к ошибочным результатам. В статье предложен метод, который заключается в том, что на каждом АНПА устанавливается набор фильтров, который отслеживает измерения и предотвращает повторное использование данных. Работа метода продемонстрирована с использованием моделирования.

В статье [36] рассмотрена задача организации навигационного обеспечения для группы АНПА без использования специальных маневров, связанных с всплытием на поверхность, и коррекции по данным GPS. Задача состоит в построении такой системы обмена сообщениями между АНПА, чтобы аппараты могли передавать и принимать не только измерения взаимных дистанций, но и данные системы счисления пути и GPS координаты (при их наличии). Система должна быть модульной, и предполагается переменное число АНПА в группе.

Для решения данной задачи предлагается хранить и обмениваться в том числе и промежуточными измерениями. Рассмотрен фильтр на основе данных системы счисления пути – на каждом временном шаге отдельный аппарат формирует вектор изменения его положения (и соответствующее увеличение неопределенности) в течение заданного интервала времени. Комбинирование всех этих векторов позволяет восстановить с определенной точностью положение аппарата. Наблюдения объектов с известными или вычисленными положениями (в данном случае через измерения расстояния) позволяют улучшить оценку положения.

Предполагается, что при передаче данных некоторые сообщения могут быть потеряны. Для преодоления этой проблемы на борту каждого аппарата используется схема хранения промежуточных измерений:

- на каждом аппарате все локальные и все принятые данные систем счисления пути, а также информация о расстояниях между аппаратами сохраняются в единой базе данных,
- измерения, которые предстоит получить отдельному аппарату, запрашиваются как часть последовательно переданных пакетов, при этом другие аппараты хранят историю таких запросов и передают запрошенные сообщения, пока они не достигнут адресата,
- когда отдельным аппаратом принят полный на-

бор данных вплоть до фиксированного шага времени, он может вычислить любую рекурсивную оценку положения или произвести полную оптимизацию положения для этого шага времени. При необходимости используется модель, основанная на предсказании, для формирования наилучшей оценки положений аппаратов.

На борту любого аппарата работает несколько фильтров, оценивающих положение каждого аппарата, что используется при распределении элементов миссии между членами группы. Преимуществом системы является то, что она может работать с переменным числом АНПА. Нагрузка на канал связи возрастает линейно с увеличением количества аппаратов.

Основная идея метода, предложенного в работах [37, 38], заключается в использовании АНПА двух типов. АНПА первого типа выполняют обследование заданной местности. АНПА второго типа служат опорными маяками, местоположение которых определяется с требуемой точностью относительно донных станций или расположенных на дне ориентиров. В процессе покрытия больших площадей АНПА перемещаются и могут меняться ролями. Задача навигации решается на основе информации от системы счисления пути и данных о взаимных расстояниях и пеленгах между АНПА. Алгоритм оценивания местоположения основан на использовании фильтра частиц. В эксперименте, описанном в [37], использовалась подводная доковая станция и АНПА Tri-dog. Станция и АНПА были оборудованы устройствами ALOC (Acoustic Localization and Communication). В работе [38] рассмотрен эксперимент, в котором четыре АНПА одновременно использовались для обследования участка дна размером  $120 \times 500$  м, а для точной локализации опорных АНПА применялись специальные донные ориентиры. Результаты аналогичных экспериментов с двумя АНПА «Tri-dog1» и одним «Tri-TON1», а также с АНПА «Tri-dog1», «Tri-TON» и «Tri-TON2» описаны соответственно в статьях [39] и [40]. В работе [41] предложено развитие данного подхода, заключающееся в передаче обследовательским аппаратам полного набора параметров оценки положения опорных маяков с целью повышения точности определения местоположения обследовательских аппаратов. Для преодоления проблемы, связанной с ограниченной скоростью передачи данных по акустическому каналу связи, пересылаемую информацию предлагается сжимать определенным образом.

В работе [42] рассмотрены вопросы навигации группы недорогих ведомых АНПА с помощью информации о дальности до ведущего АНПА,

местоположение которого известно с требуемой точностью. На основе анализа наблюдаемости формируются траектории ведомых АНПА. Для оценивания местоположения АНПА используется алгоритм, основанный на использовании фильтра Калмана.

В статье [43] предложен метод групповой навигации АНПА с одним маяком, когда в каждом цикле работы системы излучает сигнал только один АНПА, а остальные АНПА принимают его. Посредством измерения временной задержки сигналов от излучающего АНПА и маяка-ответчика обеспечивается решение навигационной задачи одновременно для всех АНПА в группе. Оценка местоположения производится на основе использования ФК.

Новый метод Double Acoustic Communication Measurement (DASM) для групповой навигации предложен в статье [44]. АНПА лидер оснащен дорогой высокоточной бортовой системой навигации, а ведомые АНПА имеют дешевую низкоточную навигационную систему. Все аппараты оборудованы акустическими модемами, предназначенными для связи и определения взаимных дистанций между АНПА. Традиционный метод трилатерации, который используется для определения координат ведомых АНПА, может приводить к значительным погрешностям. Предлагаемый метод DASM позволяет повысить точность навигации. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие его работоспособность и эффективность.

В статье [45] рассмотрена работа синхронной ГАНС. В одном случае три АНПА работают в поле двух, а во втором – четырех маяков. Наряду с измерениями дальностей до маяков рассчитываются дистанции между отдельными аппаратами. Выполнено моделирование работы системы позиционирования в условиях мелкого моря с учетом возможных пропаданий отдельных сигналов между аппаратами и маяками из-за наличия препятствий, вызванных перепадом рельефа. Основным результатом учета взаимных дистанций между АНПА является повышение точности навигации (до 1–2 см для 4 маяков и до 9–24 см для 2 маяков). В статье [46] обсуждается система групповой навигации для подводной среды на основе ФК. Рассмотрена схема с использованием SLAM, в которой наряду с информацией о внешней среде используются данные о взаимном расстоянии между отдельными аппаратами. Полученная на каждом шаге информация используется для уточнения местоположения каждого аппарата и расчета ковариационной матрицы ошибок. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований данного подхода.

Задача коллективной навигации группы АНПА также рассмотрена в статье [47]. Предполагается, что все аппараты могут обмениваться сообщениями и измерять взаимные дистанции. Оценивание траекторий движения аппаратов группы выполняется с использованием принципа максимума апостериорной вероятности, на основе которого строится алгоритм расчета местоположений аппаратов. Размер пакета сообщений, которыми обмениваются АНПА группы, линейно зависит от числа аппаратов в группе и не зависит от числа пакетов, потерянных в процессе обмена.

В статьях [48, 49] рассмотрена организация системы коллективной навигации для группы различных подводных аппаратов в рамках европейского проекта MORPH. В нем используется система из пяти автономных морских аппаратов для составления карт и научных исследований сложных неструктурированных подводных сред.

В работе [50] описывается система CSLAM (Cooperative simultaneous localization and mapping), расширяющая широкоизвестный SLAM-подход для групп АНПА. Система позволяет одновременно производить картографирование местности и корректировать координаты АНПА на основе получаемой карты. Предложен основанный на графах алгоритм формирования оптимального по размеру пакета для обмена сообщениями. Объем пакета линейно зависит от числа характерных особенностей, обнаруженных после последнего результативного обмена, постоянен для фиксированного числа аппаратов и не зависит от количества потерянных в процессе обмена пакетов. Данный подход позволяет аппаратам формировать оценку своего местоположения с ограниченной во времени ошибкой и не требует установки маяков или всплытия на поверхность для уточнения координат по GPS.

Алгоритм коллективной навигации на основе данных о взаимных дистанциях между АНПА в группе рассмотрен в статье [51]. Введен критерий оценки Moving Horizon Estimation с использованием ФК и подразделения аппаратов на ведущие и ведомые. Приведены результаты моделирования, которые демонстрируют точность и работоспособность предложенного алгоритма.

Статья [52] предлагает к рассмотрению метод навигации для группы АНПА, в которую входит как минимум один подводный аппарат с высокоточной автономной навигационной системой на основе инерциальной навигационной системы и доплеровского лага. Группа состоит из родительских и дочерних АНПА. Дочерние АНПА оснащены минимальным набором навигационных датчиков (MEMS,

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

одноосный волоконно-оптический гироскоп и камеры). Поскольку все АНПА имеют устройство акустического позиционирования и связи, дочерние АНПА могут оценивать свое состояние так же точно, как родительский АНПА, благодаря относительному позиционированию с родительским АНПА. Оценка состояния проводится на основе вероятностного подхода с помощью навигационных датчиков и акустического датчика положения. Акустическое позиционирование дочерних АНПА проводится последовательно, но сигнал позиционирования между родительским АНПА и одним дочерним АНПА также может пассивно обнаруживаться другими аппаратами. Этот метод был реализован на АНПА «Tri-Dog 1», «Tri-TON» и «Tri-TON 2». Чтобы проверить эффективность метода, были проведены морские эксперименты. Посредством моделирования последующей обработки с использованием данных экспериментов было подтверждено, что все АНПА, включая дочерние АНПА, могут осуществлять оценку положения с требуемой точностью.

Важным вопросом является наблюдаемость системы для минимизации ошибок оценивания местоположений АНПА в группе. Значительное место этому вопросу уделено в статьях [18, 42, 53, 54].

За последние годы существенный прогресс достигнут в области, связанной с организацией групповой работы подводных аппаратов. Ввиду важности большое внимание уделяется и вопросу обеспечения навигации групп АНПА. Об этом свидетельствует большое число публикаций исследователей из ведущих организаций в области подводной робототехники. Последние достижения в области разработки систем подводной связи и появление современных цифровых гидроакустических модемов сделало возможным создание на их основе систем групповой навигации нового поколения. Дальнейшее развитие таких навигационных систем для групп АНПА, судя по всему, следует ожидать в направлении интеллектуализации навигационных алгоритмов и коллективизации групп АНПА, заключающихся в организации такого поведения подводных аппаратов, которое обеспечит максимально точное определение местоположения каждого АНПА в отдельности и группы в целом.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00038).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Scherbatyuk A., Dubrovin F., Rodionov A., Unru P. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydro-acoustic Communication // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 1388–1393.
2. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1 (19). С. 4–16.
3. 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 J. of Oceanic Engineering. 2013. Vol. 38. January. P. 167–177.
4. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. 2013. Bergen. P. 1–8.
5. Eustice R.M., Whitcomb L.L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Rome, Italy. P. 1–8.
6. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China., 2016. P. 1–9.
7. 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. 1995. P. 202–208.
8. Matos A., Cruz N. Coordinated Operation of Autonomous Underwater and Surface Vehicles // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2007. Vancouver, Canada, 2007. P. 1–6.
9. Melo J., Matos A. Guidance and Control of an ASV in AUV Tracking Operations // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008. Quebec, Canada, 2008. P. 1–7.
10. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А. Некоторые результаты моделирования алгоритмов разностно-дальномерной ГАНС для обеспечения навигации групп АНПА // Материалы докл. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 2019. С. 111–119.
11. Matos A., Cruz N. Coordinated Operation of Autonomous Underwater and Surface Vehicles // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2007. Vancouver, Canada, 2007. P. 1–6.
12. Melo J., Matos A. Guidance and Control of an ASV in AUV Tracking Operations // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008. Quebec, Canada, 2008. P. 1–7.
13. Santos N., Matos A., Cruz N. Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle in a Mobile Network // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008, Quebec, Canada, 2008. P. 1–5.
14. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J. Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft // Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf. 2009. P. 331–340.
15. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft // The Int. J. of Robotics Research. 2010. Vol. 29, is. 12. P. 1–27.
16. Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2010. P. 1–6.
17. SaExperimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs // IEEE IMO

18. Bahr A, Leonard J, Martinoli A. Dynamic Positioning of Beacon Vehicles for Cooperative Underwater Navigation // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 1–8.
19. Harris Z., Whitcomb L. Preliminary Feasibility Study of Cooperative Navigation of Underwater Vehicles with Range and Range-Rate Observations // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. Washington, 2015. P. 1–6.
20. Inaba S., Sasano M., Kim K., Seta T., Okamoto A., Tamura K., Ura T., Sawada S., Suto T. Tracking Experiment of Multiple AUVs by a Semi-Submersible ASV // Proc. of the Int. Conf. UT. 2017. P. 1–4.
21. Scherbatyuk A.Ph., Dubrovin F.S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proc. of the IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, 10–12 April 2012, FEUP, Porto, Portugal. 2012. Vol. 45, is. 5. P. 1–6.
22. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon: The results of simulation and sea trials // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 7, is. 2 April. P. 189–196.
23. Behrje U., Isokeit C., Meyer B., Machle E. A Robust Acoustic-Based Communication Principle for the Navigation of an Underwater Robot Swarm // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. Kobe, 2018. P. 1–5.
24. Tan Y., Gao R., Chitre M. Cooperative Path Planning for Range-Only Localization Using a Single Moving Beacon // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 2014. Vol. 39, No. 2. April. P. 1–15.
25. Chitre M. Path planning for cooperative underwater range-only navigation using a single beacon // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Autonomous and Intelligent Systems (AIS). 2010. P. 1–6.
26. Teck T., Chatre M. Single Beacon Cooperative Path Planning Using Cross-Entropy Method // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. Kona, USA, 2011. P. 1–6.
27. Hudson J., Seto M. Underway Path-planning for an Unmanned Surface Vehicle Performing Cooperative Navigation for UUVs at Varying Depths // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2014, Chicago, IL, USA. 2014. P. 2298–2305.
28. Sergeenko N., Scherbatyuk A., Dubrovin F. Some Algorithms of Cooperative AUV Navigation with Mobile Surface Beacon // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. San-Diego, USA, 2013. P. 1–6.
29. Gao R., Chitre M. Cooperative Positioning using Range- Only Measurements Between Two AUVs // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2010. Sydney, NSW, Australia, 2010. P. 1–6.
30. Baccou P., Jouvencel B., Creuze V., Rabaud C. Cooperative Positioning and Navigation for Multiple AUV Operations // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. and Exhibition OCEANS. 2001. Vol. 3. P. 1816–1821.
31. Vaganay J., Leonard J., Curcio J., Willcox S. Experimental Validation of the Moving Long Base Line Navigation Concept // Proc. of the Int. Conf. AUV. 2004. P. 1–7.
32. 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, UT2009, Wuxi, China, April 2009. P. 1–6.
33. Mirabellot D., Sandersont A., Blidberg D. Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation // Proc. of the Int. Conf. UUST 2007. NH, USA, 2007. P. 1–6.
34. Engel R., Kalwa J. Relative Positioning of Multiple Underwater Vehicles in the GREX Project // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2009. Biloxi, USA. 2009. Vol. 42, is. 18. P. 406–411.
35. Bahr A., Walter M.R., Leonard J.J. Consistent Cooperative Localization // Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 2009. P. 1–8.
36. Fallon M.F., Papadopoulos G., Leonard J.J. A Measurement Distribution Framework for Cooperative Navigation using Multiple AUVs // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). 2010. P. 1–8.
37. Matsuda T., Maki T., Sakamaki T., Ura T. Large Area Navigation Method of Multiple AUVs based on Mutual Measurements // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2011. Kona, USA. 2011. P. 1–9.
38. Matsuda T., Maki T., Sakamaki T., Ura T. State Estimation and Compression Method for the Navigation of Multiple Autonomous Underwater Vehicles With Limited Communication Traffic // IEEE J. of oceanic engineering. 2015. Vol. 40, No. 2, April. P. 1–12.
39. Matsuda T., Maki T., Sato Y., Sakamaki T. Performance Verification of the Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs through Sea Experiments // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. 2015, Genova, Italy. 2015. P. 1–9.
40. Matsuda T., Maki T., Sakamaki T., Ura T. State Estimation and Compression Method for the Navigation of Multiple Autonomous Underwater Vehicles With Limited Communication Traffic // IEEE J. of oceanic engineering. 2015. Vol. 40, No. 2, April. P. 1–12.
41. Matsuda T., Maki T., Sato Y., Sakamaki T. Experimental Evaluation of Accuracy and Efficiency of Alternating Landmark Navigation by Multiple AUVs // IEEE J. of oceanic engineering. 2018. Vol. 43, No. 2. P. 1–23.
42. Daxiong J., Jian L. A Navigation Method for Multiple Robots Based on a Single Mobile Node // ROBOT. 2012. Vol. 34, No. 6 November. P. 1–5.
43. Sun S., Yu S., Shi Z., Fu J., Zhao C. A Novel Single- Beacon Navigation Method for Group AUVs Based on SIMO model // IEEE Access-2018-17815. 2018. Vol. 6. P. 1–14.
44. Zhang L., Liu M., Zhang F. Cooperative Localization Method for AUV Using Acoustic Communication Measurement // Advanced Engineering Forum. 2012. Vol. 4. P. 227–231.
45. Pentzer J., Wolbrecht E. Improving Autonomous Underwater Vehicle Navigation Using Inter-Vehicle Ranging // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. 2012. P. 1–8.
46. Nogueira M., Sousa J., Pereira F. An Underwater Cooperative Navigation Scheme // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2013. Bergen. 2013. P. 1–7.
47. Paull L., Seto M., Leonard J. Decentralized Cooperative Trajectory Estimation for Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2014, Chicago, IL, USA. 2014. P. 1–8.
48. Furfaro T., Alves J. A Communications and Relative Navigation Architecture for Underwater Vehicle Coordination // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2015. Washington, DC, USA. 2015. P. 1–6.
49. Pascoal A., Ribeiro J., Ribeiro M., Rufino M., Sebastiao L., Silva H. Cooperative Navigation and Control: the EU MORPH project // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2015. Washington, DC, USA. 2015. P. 1–10.
50. Paull L., Huang G., Seto M., Leonard J. Communication-Constrained Multi-AUV Cooperative SLAM // Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA-2015). Seattle, WA, USA. 2015. P. 1–8.
51. Zhang L., Xu S., Liu M., Xu D. Cooperative Localization for Multi-AUVs Based on Time-Of-Flight of Acoustic Signal Using Moving Horizon Estimation // MTS. 2015. P. 1–5.
52. Matsuda T., Maki T., Sakamaki T. Multiple AUV Navigation Based on a Single High-performance AUV for Accurate and Efficient Seafloor Survey. Sea Experiments with 3 AUVs // Proc. of the MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). 2018. P. 1–7.
53. Antonelli G., Arrichiello F., Chiaverini S., Sukhatme G. Observability analysis of relative localization for AUVs based on ranging and depth measurements // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 3–8, 2010, Anchorage, Alaska, USA. 2010. P. 1–6.
54. Nogueira M., Sousa J., Pereira F. Cooperative Autonomous Underwater Vehicle Localization // Proc. of the MTS/ IEEE Int. Conf. OCEANS 2010, Sydney, Australia. 2010. P. 1–6.