**Темы:**

1. Система управления автономными подводными аппаратами по схеме "ведущий-ведомый" в задачах поиска с использованием сонаров бокового обзора и гидроакустических средств навигации – **«A Leader-Follower Autonomous Underwater Vehicle Systems in Search Tasks Using Side Scan Sonars and Hydroacoustic Navigation»**.
2. Синхронизация данных и координация между ведущим и ведомыми автономными подводными аппаратами посредством гидроакустической навигации – **«Data Synchronization and Coordination Among Leader and Follower Autonomous Underwater Vehicles Using Hydroacoustic Navigation»**.

**Аннотация (Abstract)**

…

1. **Введение (Introduction)**

Благодаря развитию вычислительных и сенсорных технологий автономные подводные аппараты (АНПА) способны выполнять задачи, которые ранее считались невозможными. В настоящее время ведутся исследования, направленные на разработку новых методов повышения эффективности и результативности операций, выполняемых с помощью АНПА. Одним из таких направлений исследований является кооперативное управление, позволяющее нескольким одновременно работающим АНПА координировать свои усилия для выполнения поставленных задач.

Формирование системы управления несколькими автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) является актуальной темой для многих исследователей. В последнее время все больший интерес представляют групповые системы, поскольку при их использовании достигается устойчивость к таким ситуациям, как отказ работы аппарата, а также сокращается объем работ, выполняемых одним аппаратом. Для многих приложений, таких как наблюдение, обезвреживание мин, вместо одиночного АНПА используется группа АНПА, которая движется по заданной траектории, сохраняя при этом заданную геометрическую форму. В целом, под управлением группой понимается управление относительным положением и ориентацией нескольких АНПА в группе, в то время как группа в целом следует по заданной траектории.

Благодаря совместному взаимодействию и обмену информацией между аппаратами в режиме, близком к реальному времени, становится возможным координировать действия одновременно работающих АНПА. Кооперативное поведение позволяет аппаратам корректировать свои действия и реагировать на информацию, собираемую другими аппаратами в группе, что дает возможность динамически корректировать свои действия, чтобы лучше справляться с текущей ситуацией. Кроме того, такой подход позволяет сократить время выполнения миссии более чем в два раза, а также обеспечивает дополнительную гибкость конфигурации аппарата.

Для проведения таких исследований существует два основных мотивирующих фактора. Первый – разработка базовых принципов и инструментов, необходимых для создания сложных кооперативных моделей поведения АНПА. Второй фактор – поддержка текущих исследований в области гидроакустической связи.

К основным приложениям группового управления возможно отнести следующие кейсы:

1. Подводная разведка и картирование: MMT-300 с высокоточными датчиками может использоваться для составления карты подводного рельефа при помощи ГБО и определения точек интереса стереопарой, а другой аппарат с гидроакустической связью поможет передавать данные и координировать исследовательские работы.

2. Мониторинг окружающей среды: Аппараты способны работать вместе для сбора данных о качестве воды, температуре и распределении морских обитателей. MMT-300 может обеспечить точные измерения, а другой аппарат поможет охватить большую территорию и передать данные на центральную станцию мониторинга.

3. Инспекция подводной инфраструктуры: Аппараты могут использоваться для обследования подводных трубопроводов, кабелей и других объектов инфраструктуры. MMT-300 может проводить детальный осмотр, а другой аппарат - помогать в навигации в ограниченном пространстве и поддерживать связь с операторами на поверхности.

4. Поисково-спасательные операции: В случае чрезвычайной ситуации под водой совместное управление аппаратами может быть использовано для поиска и обнаружения пропавших людей или объектов. MMT-300 может обеспечить точную схему поиска, в то время как другие аппараты могут помочь охватить осмотровую область и подсветить морское дно штатными средствами.

5. Обслуживание подводных сетей связи: Аппараты могут использоваться для обслуживания и ремонта подводных сетей связи. MMT-300 может помогать в выявлении проблем системой технического зрения, а другой аппарат - оказывать поддержку и передавать информацию техникам на поверхности.

6. Подводная археология: Совместное управление подводными аппаратами может быть использовано в археологических экспедициях для изучения и документирования затопленных исторических объектов. MMT-300 может делать снимки высокого разрешения и создавать 3D-карты подводных артефактов средствами ГБО, в то время как другой аппарат может помогать маневрировать вокруг хрупких конструкций и помогать водолазам в их исследовании.

7. Морская энергетическая промышленность: Аппараты могут использоваться для осмотра и обслуживания морской энергетической инфраструктуры, например, нефтяных вышек и ветряных электростанций. MMT-300 может проводить детальный осмотр оборудования и конструкций, в то время как другой автомобиль может помочь в транспортировке инструментов и оборудования для технического обслуживания и ремонта.

8. Подводная безопасность и оборона: Совместное управление подводными аппаратами может применяться в операциях по обеспечению безопасности и обороны, таких как слежение, разведка и защита подводных объектов. Высокоточные сенсоры MMT-300 могут обеспечить детальное наблюдение, в то время как другие аппараты могут помочь в координации усилий по обеспечению безопасности и развертывании контрмер в случае необходимости. В частности, имеет место задача разминирования посредством более дешевых аппаратов из управляемой группы.

В заключение следует отметить, что совместное управление подводными аппаратами с различными возможностями открывает широкие возможности для разведки, исследований, обслуживания и обеспечения безопасности в сложной подводной среде. Эта технология способна произвести революцию в различных отраслях промышленности и науки, обеспечив эффективные и действенные решения для подводных операций.

Обзор подходов группового управления и спектра его применения.

Обзор каждой секции работы.

1. **Постановка задачи (Problem statement)**

Автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) – это беспилотное свободно плавающее транспортное средство, практически не требующее вмешательства человека после его развертывания. Большинство АНПА напоминают миниатюрные подводные лодки или торпеды, передвигающиеся по воде с помощью силовой установки, состоящей, как правило, из электродвигателей и гребных винтов. Данные, полученные от инерциальных датчиков, акустического доплеровского лага (DVL), компаса или других навигационных датчиков, интегрируются и обрабатываются бортовым компьютером, который обычно задействует фильтр Калмана для оценки положения и ориентации аппарата. Общее управление и поведение аппарата контролируется бортовым компьютером, что позволяет ему выполнять задачи без необходимости подачи низкоуровневых команд оператору. Как правило, АНПА работают от аккумуляторов. В некоторых случаях используются более мощные источники энергии, например, топливные элементы.

Общие координаты автономного подводного транспортного средства определяются в геоцентрической системе координат по SNAME-нотации:

где определяет расположение при продольном, боковом и вертикальном перемещении, соответственно, а вектор определяет углы Эйлера: крен, тангаж и рыскание, соответственно. Вектор скоростей выражается в системе координат, связанной с телом. Скорости по объявленной выше нотации следует записывать как

Пусть ведущий (*leader*) подводный аппарат имеет координаты

,

где – положение и глубина в мировой системе отсчета,

– ориентация относительно мировой системы отсчета.

Угол здесь является азимутальным и определяет курс подводного аппарата относительно северной оси мировой системы отсчета посредством магнетометра (MS), а углы и представляют собой крен и тангаж относительно вектора гравитационного ускорения, которые представляются выходными данными модуля инерциальной навигации (IMU).

Значение глубины рассчитывается на основании показаний внутреннего датчика давления (PS). Величины и определяются в результате преобразования геоцентрических данных GPS (долготы и широты) в прямоугольную систему. Координаты при этом представляются посредством взаимодействия USBL-буя на поверхности воды и УКБ-антенны ведущего подводного аппарата. Продукты данного взаимодействия: наклонная дальность до приемника и азимутальный угол, по которым осуществляется расчет смещения относительно положения буя, позволяющего скорректировать позицию подводного аппарата.

Для успешного выполнения большинства задач необходимо, чтобы АНПА могли точно определять свое местоположение. Например, если АНПА используется для выполнения операции поиска, классификации, картографирования в рамках противоминной борьбы, очень важно, чтобы машина могла точно определить положение обнаруженных минных объектов, чтобы впоследствии эффективно выполнить операции по повторному захвату, опознанию, нейтрализации. В случае океанографических исследований аппарат должен точно знать свое местоположение, иначе собранные данные и картографическая информация будут неточными.

Предполагается, что ведущий подводный аппарат обладает более расширенной и эффективной аппаратной базой, имея за исключением объявленных выше средств, допплеровский лаг для измерения абсолютного вектора скорости. Ведомые подводные аппараты характеризуются наличием исключительно модуля инерциальной навигации, датчика давления, магнитометра и УКБ-антенны для возможности обмена данными с ведущим.

Введем обозначения положения и ориентации для *i*-го ведомого (*follower*) подводного аппарата как

,

где – положение и глубина в мировой системе отсчета,

– ориентация относительно мировой системы отсчета.

Очевидно, что ведомые подводные аппараты не имеют возможности получать положение в мировой системе отсчета за исключением глубины. Из этого следует сокращение размерности состояния на две величины.

В силу ограниченности широты акустической передачи необходимо пересылать набор исключительно необходимых данных. В рамках задачи группового управления ведомым подводным аппаратам требуется знание курса, глубины и расстояния до ведущего. Последнее определяется средой распространения акустического сигнала. Акустические модемы обычно оснащаются функцией определения расстояния между двумя модемами. Это активная система, которая требует от модема, запрашивающего дальность, посылать запрос на соответствующий модем, который, в свою очередь, передает ответ. Модем, запрашивающий дальность, измеряет время, прошедшее с момента отправки запроса до момента получения ответа. Временная информация затем корректируется для пересчета времени прохождения в одну сторону, которое используется в сочетании со скоростью распространения звука в воде для определения расстояния между двумя датчиками как

где – скорость распространения акустических волн под водой,

– время распространения акустической волны до *i*-го приемника.

Пусть желаемая траектория известна ведущему АНПА, а сопровождающий АНПА должен поддерживать определенное расстояние и ориентацию относительно ведущего. Расстояние, как было объявлено ранее, определяется посредством взаимодействия УКБ-приемопередатчиков, а ориентация при помощи цифрового магнитного компаса (магнетометра).

Реализация эффективного кооперативного управления "ведущий-ведомый" применительно к АНПА сопряжена с рядом трудностей, в том числе:

1. Связь: Установление надежной связи между ведущим и ведомыми имеет решающее значение для обеспечения координации и передачи навигационной и траекторной информации.

2. Управление формацией: Обеспечение того, чтобы ведомые сохраняли желаемую формацию относительно ведущего при учете динамики и внешних возмущений, представляет собой серьезную проблему.

3. Наблюдение за лидером: Ведомые должны точно отслеживать положение и скорость лидера, чтобы сохранять желаемую формацию и адаптироваться к изменениям в траектории движения лидера.

4. Планирование траектории и локализация: Эффективные алгоритмы планирования траектории и точные методы локализации необходимы для построения оптимальной траектории и сохранения целостности строя.

Гидроакустическая связь является перспективным методом связи для совместного управления подводными аппаратами. Акустические или телесонарные модемы обеспечивают двунаправленную полудуплексную беспроводную связь подводной связи, что позволяет нескольким АНПА обмениваться данными без всплытия или физического соединения с помощью кабеля. Для связи используются звуковые волны, передаваемые через воду, что обеспечивает надежную связь на большие расстояния при низком энергопотреблении.

Акустические модемы обычно получают данные от компьютера АНПА по проводному последовательному каналу связи, например RS-232. Затем модем кадрирует данные и кодирует кадр, добавляя информацию для обнаружения и исправления ошибок. Далее сигнал модулируется на несущую частоту и передается с помощью преобразователя, который преобразует электрические сигналы в акустические волны давления. Волны давления восстанавливаются преобразователем, подключенным к приемному модему, который демодулирует сигнал, декодирует данные, исправляет ошибки и передает полученные цифровые данные на компьютер принимающего бортового компьютера.

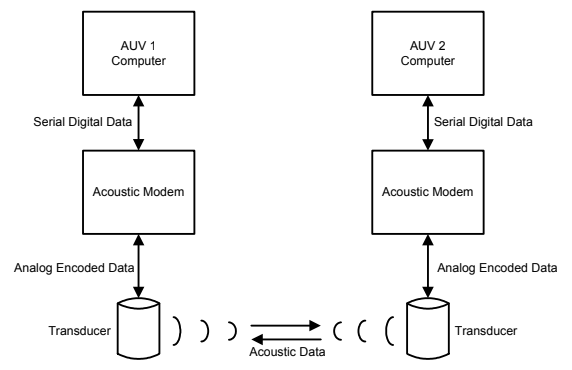


Рисунок – Схема обмена данными между АНПА по акустическому каналу

Гидроакустическая связь имеет ряд преимуществ в контексте кооперативного управления АНПА:

1. Дальность и проникающая способность: Звуковые волны способны преодолевать большие расстояния под водой и проникать сквозь препятствия, что делает гидроакустическую связь пригодной для масштабных операций АНПА и связи в сложных подводных условиях.

2. Низкие требования к энергопотреблению: По сравнению с другими методами связи, такими как радио- или оптическая связь, гидроакустическая связь требует относительно низких затрат энергии, что делает ее экономичной для АНПА.

3. Устойчивость: Гидроакустическая связь менее восприимчива к помехам и ослаблению сигнала, вызванным подводными условиями, таких как мутность и подводный шум.

4. Синхронизация: Гидроакустическая связь обеспечивает точную синхронизацию времени между АНПА, что очень важно для согласованного управления и объединения данных.

Для гидроакустической связи обычно используются специализированные модемы, предназначенные для работы под водой. Эти модемы используют для связи звуковые волны в диапазоне от десятков до сотен килогерц. Для достижения надежной скорости передачи данных, пригодной для совместного управления, в них используются передовые методы обработки сигналов.

Поскольку максимальная скорость передачи данных для акустических модемов достигается при минимальном расстоянии между передающим и принимающим модемами, поведение "следования за лидером" позволит добиться большей оптимальности с использованием нескольких АНПА.

При проведении кооперативной локализации для оценки положения АНПА необходимо применять различные технологии оценки состояния. Фильтр Калмана (ФК) является наилучшим байесовским оценщиком для линейных систем с гауссовской неопределенностью. Однако модель кооперативной системы локализации с несколькими АНПА типа "ведущий-ведомый" часто является нелинейной. Поэтому для оценки состояния обычно используется расширенный фильтр Калмана (EKF) или сигма-точечный фильтр Калмана (UKF).

Калмановская фильтрация дает ряд преимуществ при кооперативном управлении АНПА:

1. Точность оценки: Калмановская фильтрация позволяет получить оптимальную оценку состояния системы, используя как данные измерений, так и прогнозы динамической модели.

2. Уменьшение шума: Используя статистические свойства шума, фильтрация Калмана позволяет эффективно снизить влияние шума измерений на оценку состояния и повысить точность.

3. Оценка в реальном времени: Калмановская фильтрация работает в режиме реального времени, что делает ее пригодной для приложений совместного управления АНПА, требующих своевременной оценки состояния.

В контексте совместного управления АНПА фильтрация Калмана имеет различные применения, в том числе:

1. Слежение за лидером: Фильтры Калмана позволяют оценить положение и скорость лидера на основе зашумленных измерений, полученных от датчиков ведомых, что позволяет ведомым точно отслеживать траекторию движения лидера.

2. Управление формациями: Фильтры Калмана могут оценивать относительные положения и скорости ведомых по отношению к ведущему, что облегчает поддержание желаемой формации и координации.

3. Локализация: Фильтры Калмана могут объединять измерения, полученные от нескольких АНПА, для повышения точности локализации, что позволяет осуществлять точную навигацию и управление.

Кооперативное управление "лидер-последователь" с использованием гидроакустической связи и фильтра Калмана имеет большой потенциал для расширения возможностей и повышения эффективности автономных подводных аппаратов. Гидроакустическая связь обеспечивает надежную дальнюю связь, а фильтрация Калмана позволяет точно оценивать положение лидера и облегчает управление группой. Однако для полного использования преимуществ совместного управления АНПА необходимы дальнейшие исследования, направленные на решение таких задач, как надежная синхронизация, адаптивные алгоритмы управления формацией и планирование траектории в реальном времени.

В целом, интеграция гидроакустической связи и фильтрации Калмана в системах совместного управления "лидер-последователь" позволяет расширить возможности АНПА и облегчить выполнение сложных подводных задач.

В настоящей работе определяются алгоритмы и правила, необходимые для реализации кооперативного поведения АНПА по принципу "следования за лидером". Для успешного достижения поставленной цели и создания инструментария, необходимого для дальнейшего развития кооперативного управления, необходимо решить следующие подзадачи.

1. Разработать процедуры и алгоритмы, необходимые для уменьшения относительных навигационных ошибок между транспортными средствами, используя средства GPS, бортовых датчиков и гидроакустической связи.

2. Разработать алгоритм и правила следования за лидером, необходимые для решения проблемы непредсказуемости акустической связи.

3. Разработать программные средства многократного использования, которые могут быть применимы для синтеза будущих моделей кооперативного управления.

4. Валидация разработанных алгоритмов с помощью имитационного моделирования на основе реальных физических объектов.

Описать ситуацию синхронного обхода заданной площади с возможностью перестройки маршрута по сигналу с ГБО.

Дать краткое описание системы позиционирования/управления (схема взаимодействия компонентов).

1. **Методы и средства (Materials and Methods)**
   1. **Математические модели АНПА:** привести норвежскую нотацию, дать ссылку на статью с ММТ-300. Расписать модель гибридного ПА.

При условии гидродинамических эффектов, создаваемых водной средой, возможно записать выражение для динамики подводного аппарата в следующей форме

где – матрица инерции твердого тела ( – число степеней свободы),

– матрица присоединенных масс,

– матрица Кориолиса твердого тела ,

– матрица присоединенных масс Кориолиса,

– матрица диссипативных сил (сил рассеивания),

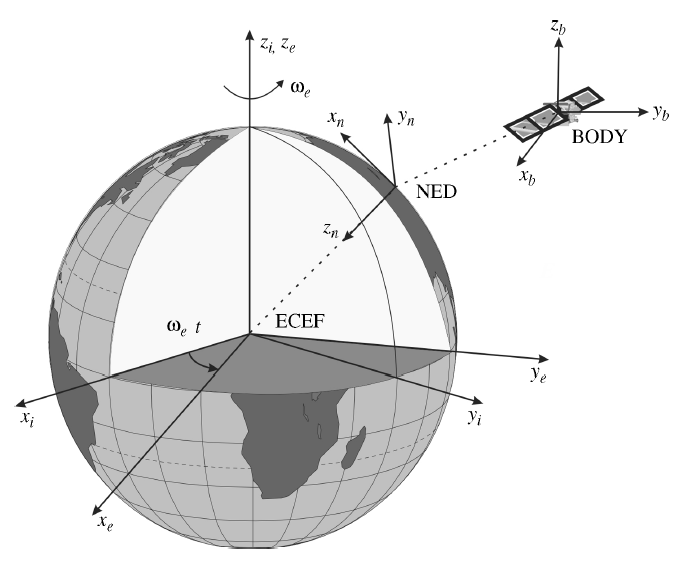
– вектор гравитационных сил и моментов,

– вектор (сил и моментов) управлений, приложенных телу,

– вектор (сил и моментов) внешних возмущений, приложенных телу.

* 1. **Гидроакустические средства:** привести характеристики модемов от "uWave", описать преимущества LBL-системы.
  2. **Системы координат:** расписать связь геоцентрической системы координат (GPS) и декартовой.

Положение АНПА и буев в мировой системе координат (NED) определяется как , и . Последняя величина определяется относительно уровня моря и представляет собой глубину буя, определяемую при помощи датчика давления.



Положение буя является ключевым моментов в пересчете координат наблюдаемого объекта. Определить его возможно при помощи GPS или ГЛОНАС систем, расположенных либо на базовой станции, либо непосредственно на буе. При этом требуется преобразование долготы и широты в прямоугольную метрическую систему координат для последующей обработки. Прямоугольные координаты точек в пространстве можно вычислить по известным геодезическим координатам этих точек (широта , долгота , высота ) по формулам

где – радиус кривизны первого вертикала, и – экваториальный (большая полуось) и полярный радиусы (малая полуось), соответственно, – квадрат первого эксцентриситета эллипсоида.

Так как рассматриваемая система географически располагается в системе Земли, то экваториальный радиус км, а полярный радиус км.

Предполагается, что центр навигационной системы координат – это положение буя в начальный момент наблюдений. Полученные из уравнения (1) координаты возможно перевести в систему локальной плоскости с учетом принятого центра системы по следующим выражениям

где – координаты, смещенная относительно локального центра в прямоугольной системе отсчета, , .

* 1. **Модели измерений:** расписать модели измерения для каждого устройства системы (GPS, IMU и т.д.).

Ни один прибор не может производить измерение идеально, то есть без погрешностей. Погрешность – разница между истинным значением величины и фактическим, измеряемым прибором. Погрешности приборов делятся на случайные и систематические составляющие. Случайные составляющие также называются случайными ошибками измерений. Их конкретную реализацию к тому или иному моменту времени нельзя предсказать, можно лишь описать общий вид их поведения. Математическая модель случайных составляющих определяется как последовательность суммы отсчетов белого шума с отсчетами процесса Маркова или фликкер-шума [24]. Определение характеристик случайных процессов позволяет верно описать их динамику при интеграции ИНС с другими датчиками, повысив качество фильтрации.

При комплексировании ИНС с другими датчиками смещения нулей акселерометров и гироскопов включаются в вектор оцениваемых параметров: это позволяет учесть их случайную составляющую, которая является основным источником ошибок позиционирования после компенсации других систематических погрешностей. Наибольший эффект на смещение нулей МЭМС-датчиков оказывает температура, в то же время её влияние на неортогональности осей и погрешности масштабных коэффициентов ограничено.

Выходной вектор измерений скорости от блока трех-осевого акселерометра моделируется как

*,*

где , – СКО ошибки акселерометра, – смещение акселерометра, которое моделируется как марковский процесс 1-го порядка.

Аналогично, фактический выход гироскопа определяется как

*,*

где , – СКО ошибки гироскопа, – смещение гироскопа, которое моделируется как марковский процесс 1-го порядка.

Глубина и подводное давление имеют прямую зависимость. По мере углубления аппарата в воду показания давления линейно увеличиваются.

Фактический выход датчика глубины моделируется путем добавления шума к действительной глубине

,

где , – СКО ошибки по глубине.

Доплеровский лаг измеряет изменение акустической частоты для определения скорости транспортного средства относительно морского дна. Фактический выход допплеровского лага моделируется путем добавления шума к действительной скорости аппарата

*,*

где , , – СКО ошибки по скорости.

Система подводного акустического позиционирования измеряет расстояние и направление движения транспортного средства от опорных позиций. Она может быть сопряжена с GPS для обеспечения координат, связанных с Землей. Однако на оценку акустической позиции влияют точность GPS, установка системы, положение судна, профиль скорости звука, изгиб лучей и шум при измерении [18].

Предполагается, что система точно откалибрована, установка и положение буев оказывают незначительное влияние. Математическая модель фактического выходного сигнала системы имеет вид

*,*

где , – СКО ошибки позиционирования, – это изменяющееся во времени смещение, моделируемое как марковский процесс 1-го порядка и зависящее от профиля скорости звука и эффекта изгиба луча.

* 1. **Модель оценки состояния:** расписать необходимость фильтрации состояния ведущего (из-за высокой дискретности системы), остановиться на одном из фильтров Калмана.
  2. **Методы определения положения:** расписать алгоритмы определения положения ведущего по двум маякам и трилатерации для ведомых.

При наличии двух и более буёв возможно осуществлять восстановление информации о местоположении объекта-модема при помощи механизма использования наклонных дальностей для перерасчета позиции в мировой системе координат по GPS или ГЛОНАСС.

Рассматривается задача, в которой задействованы два буя. Их расположения при продольном, боковом и вертикальном перемещенияхопределяются векторами и . Полагая, что глубина постоянна (без учета волновых возмущений), возможно пренебречь величинами и , получив положения на плоскости и .

Возможность получать наклонные дальности до объекта интереса в виде подводного аппарата позволит рассчитать его положение, но предварительно требуется знание его глубины (полагаем, что датчик давления работает всегда) для определения проекции дальности на плоскость XY. Обозначая наклонные дальности как и получим выражения для их проекций на плоскость

В дальнейшем задача определения координат сводится к геометрической задаче поиска точек пересечения двух окружностей центрами которых являются положения буёв, а радиусами найденные ранее проекции и .

Расстояние между окружностями позволит воспользоваться теоремой косинусов

Возможные положения подводного аппарата теперь определяются выражением

где – единичный вектор от первого до второго центра,

– перпендикуляр к единичному вектору.

Двойственность решения уравнения разрешается, если известно предыдущее значение положения подводного аппарата. В таком случае требуется выбрать точку наиболее близкую к последнему положению аппарата.

****

1. **Предложенный алгоритм (Proposed algorithm)**
   1. **Описать алгоритм позиционирования:** по двум дальностям определяем положение ведущего с фильтром Калмана, затем уже по трем дальностям пересчитываем положение ведомых.
   2. **Описать алгоритм нелинейной фильтрации состояния:** привести уравнение для восстановления состояния.
   3. **Описать алгоритм траекторного управления ведущего**.
   4. **Описать алгоритм удержания формации ведомыми**.
   5. **Описать алгоритм перестройки траектории/формации.**
2. **Результаты экспериментов (Experimental results)**

Привести описание средств моделирования, результаты моделирования ситуации.

1. **Обсуждение (Discussion)**

Описание результатов и вектора дальнейшего развития работы.