

На правах рукописи

Дубровин Федор Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОДНОМАЯКОВОЙ  
НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ  
АППАРАТОВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Владивосток – 2013

Работа выполнена в лаборатории необитаемых подводных аппаратов и их систем Дальневосточного федерального университета.

Научный руководитель: Щербатюк Александр Федорович,  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук

Официальные оппоненты: Розенбаум Анатолий Наумович,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией прогнозирования  
состояния и надежности технических систем  
ИАПУ ДВО РАН

Костенко Владимир Владимирович,  
кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией исполнительных устройств и  
систем телеуправления ИПМТ ДВО РАН

Ведущая организация: Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Защита состоится «21» июня 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 005.007.01, д.т.н.



А.В. Лебедев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) хорошо зарекомендовали себя как эффективное средство для выполнения широкого спектра подводных работ и исследований, таких как поиск затонувших объектов, разведка полезных ископаемых, картографирование дна, экологический мониторинг, поиск и обследование протяженных объектов и т. д. Вместе с тем, ценность предоставляемых подводным аппаратом данных в большинстве случаев определяется точностью их навигационной привязки. В связи с этим разработка систем высокоточной навигации АНПА является чрезвычайно важной и актуальной задачей современной подводной робототехники. Большой вклад в это направление внесли как российские (М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, А. Ф. Щербатюк и другие), так и зарубежные (D. Blidberg, A. Healey, T. Ura, J. Bellingham, A. Pascoal и многие другие) исследователи.

В настоящее время все большее число ставящихся перед АНПА задач требуют от обеспечивающего его работу навигационного комплекса высокой мобильности. Существующие традиционные методы навигации АНПА строятся на базе бортовой системы счисления пути (ССП). Недостатком работы СПП является постепенное накопление ошибок в определении местоположения АНПА. Эти ошибки могут составлять от нескольких десятков до сотен метров за час работы системы. В результате СПП не способна самостоятельно обеспечить высокую точность навигации АНПА при выполнении достаточно продолжительных миссий. Всплытие АНПА на поверхность для уточнения местоположения при помощи системы спутникового позиционирования является слишком затратным во временном и энергетическом плане.

Для уменьшения накапливающейся со временем ошибки счисления необходимо периодически выполнять процедуру коррекции счисленных координат на основе данных, получаемых от других навигационных систем. Среди последних наиболее широкое распространение получили гидроакустические навигационные системы с длинной и ультракороткой базой (ГАНС ДБ, ГАНС УКБ). ГАНС ДБ предполагает развертывание и калибровку сети придонных гидроакустических маяков перед началом выполнения работ, а также их подъем по завершению работ. Данные операции могут занять до нескольких суток. При этом имеется вероятность утраты маяков. Кроме того, дальность действия такой системы обычно не превышает 10 км. При обследовании больших площадей возникает необходимость в многократной переустановке системы, что существенно увеличивает время и стоимость выполнения работ. ГАНС УКБ не могут обеспечить приемлемую точность при дистанциях между маяком и АНПА более 1 км из-за больших ошибок определения пеленга на маяк. Поэтому традиционные ГАНС в общем случае не способны обеспечить одновременно высокую мобильность робототехнического комплекса и точность навигации.

Одним из подходов к созданию мобильного навигационного комплекса для АНПА является использование гидроакустических навигационных систем с мобильной сетью маяков. Однако стоимость таких систем и их эксплуатации высока. Другим подходом является разработка гидроакустических навигационных

систем с синтезированной длинной базой (ГАНС СДБ), которые используют единственный мобильный гидроакустический маяк. В последние годы широкие исследования в области создания мобильных навигационных систем для позиционирования подводных аппаратов проводятся в Массачусетском технологическом институте, Вудсхолском океанографическом институте, техническом университете Порто и других ведущих в области подводной робототехники организациях. Однако до сих пор нет законченных работающих на АНПА версий ГАНС СДБ. Поэтому задача разработки алгоритмического обеспечения мобильной одномаяковой навигации для АНПА по-прежнему остается важной и актуальной. Другой не менее важной и актуальной проблемой является обеспечение длительного функционирования АНПА под водой. Для этого необходимо, чтобы подводный аппарат периодически приводился к гидроакустическому маяку для подзарядки аккумуляторных батарей, передачи накопленной информации и получения нового задания.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование методов и алгоритмов навигации АНПА, основанных на использовании одного мобильного гидроакустического маяка.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставились и решались следующие **задачи**:

1. Разработка метода определения координат АНПА с помощью одного мобильного гидроакустического маяка.
2. Разработка метода формирования траекторий движения мобильного маяка для повышения точности навигации АНПА.
3. Разработка алгоритмов автоматического приведения АНПА к гидроакустическому маяку на основе дальномерной информации.
4. Разработка структуры системы одномаяковой навигации и ее реализация на борту подводного аппарата «МАРК».

**Методы исследования.** При выполнении работы применялись методы теории автоматического управления, навигации, фильтрации, принятия решений, теории вероятностей и математической статистики, численного анализа, математического моделирования, а также проводились морские эксперименты.

**Научная новизна результатов** диссертационной работы:

1. Разработан метод навигации АНПА при помощи одного мобильного гидроакустического маяка, включающий в себя новый способ формирования и обработки навигационной информации для определения неизвестного начального местоположения АНПА, основанный на специальным образом организованном движении маяка относительно неподвижного АНПА, а также алгоритм на основе фильтра Калмана, позволяющий обеспечить с необходимой точностью навигацию АНПА при его движении по произвольной траектории в процессе выполнения миссии.
2. Впервые предложен метод формирования траектории движения мобильного гидроакустического маяка, основанный на решении задачи минимизации ошибки оценивания местоположения АНПА путем использования информации о дальности между АНПА и маяком в точках формируемой траектории, а также

текущей ковариационной матрицы ошибок определения местоположения АНПА.

3. Разработан алгоритм автоматического приведения АНПА к гидроакустическому маяку с неизвестными координатами, заключающийся в определении наиболее вероятного местонахождения маяка путем постепенного уточнения его положения по мере получения измерений дальности до него в процессе движения АНПА.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что предложенные методы и алгоритмы, использующие для решения задачи определения местоположения АНПА с требуемой точностью информацию о дальностях до одного движущегося гидроакустического маяка, позволяют обеспечить высокую мобильность подводного робототехнического комплекса и существенно повысить эффективность его использования при решении широкого круга задач в море.

Предложенная структура системы одномаяковой навигации, а также разработанные методы и алгоритмы реализованы и используются в составе навигационно-управляющей системы подводного робототехнического комплекса «МАРК», который был разработан в научно-образовательном центре «Подводная робототехника», созданном на основе ИПМТ ДВО РАН и ДВФУ.

Представленные в диссертационной работе исследования выполнены в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 02.740.11.0166 на выполнение в период 2009-2011 гг. научно-исследовательской работы по теме «Разработка многофункционального малогабаритного необитаемого подводного аппарата»), гранта РФФИ № 10-08-00249 на период 2010-2012 гг. на тему «Разработка комплексов интеллектуальных подводных роботов для долговременного сбора данных в океане», а также гранта ДВО РАН № 12-III-B-3-028 на тему «Разработка и исследование алгоритмов навигации автономных необитаемых подводных аппаратов, предназначенных для повышения мобильности подводных робототехнических комплексов», выполненного в 2012 г.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод определения местоположения АНПА при помощи одного мобильного гидроакустического маяка.
2. Метод формирования траектории движения мобильного гидроакустического маяка, обеспечивающий повышение точности навигации подводного аппарата.
3. Алгоритм автоматического приведения АНПА к гидроакустическому маяку с неизвестными координатами, использующий информацию о дальностях между АНПА и маяком, а также данные от бортовой системы счисления пути подводного аппарата.
4. Структура системы одномаяковой навигации для АНПА.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** обеспечиваются корректным применением использованных в работе математических методов и подтверждаются результатами численного моделирования и натурных

экспериментов. Результаты исследования соответствуют основным общепринятым теоретическим и практическим положениям.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих всероссийских и международных научно-технических конференциях:

- Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике, Владивосток, 2010 г.
- Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана», Владивосток, 2011 г.
- International Conference and Exhibition «Underwater Intervention 2011», New Orleans, USA, 2011.
- Четвертая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления, локальная научно-техническая конференция «Управление в распределенных сетевых и мультиагентных системах», Геленджик, 2011 г.
- XII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований», Москва, 2011 г.
- IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, FEUP, Porto, Portugal, 2012.
- ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Vladivostok, Russia, 2012.

**Публикация результатов работы.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, списка условных сокращений, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 150 наименований, и двух приложений. Работа изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 70 рисунков и 8 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность направления исследований, выполненных в диссертационной работе, приводится обзор современных разработок в данной области, формулируются цель и задачи исследования. Также в данном разделе приводится требуемая точность навигации АНПА: при решении большинства прикладных задач с использованием АНПА ошибка определения его местоположения не должна превышать 10 метров, а в некоторых случаях погрешность оценивания координат АНПА должна быть менее 1 метра.

**В первой главе** выполнен анализ современных методов определения местоположения АНПА, повышающих мобильность подводного робототехнического комплекса. Одним из подходов, позволяющих устранить привязку к конкретному району проведения работ, является использование сети гидроакустических маяков, выполненных в виде буев, движущихся по поверхности моря и определяющих свое местоположение с помощью систем спутникового позиционирования.

Другим способом создания мобильного навигационного комплекса для АНПА является разработка ГАНС с синтезированной длинной базой (СДБ). Основная идея такого подхода состоит в использовании единственного мобильного гидроакустического маяка, выполненного в виде автономного необитаемого водного (поверхностного) аппарата (АНВА). Работа навигационных систем данного класса основана на применении модемной гидроакустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и мобильным маяком и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними.

**Во второй главе** рассматривается задача определения местоположения АНПА на основе использования одного мобильного гидроакустического маяка. Данная задача разделяется на две задачи. Одна из них связана с определением начальных координат АНПА. Начальное местоположение аппарата может быть неизвестно или ошибка в определении начальных координат АНПА может быть велика. Решению указанной задачи посвящена вторая глава. Другой задачей является уточнение текущего местоположения АНПА в случае, когда ошибка оценивания координат аппарата не превышает заданный порог. Решение данной задачи описано в третьей главе.

Потребность в решении первой задачи возникает на практике при выполнении глубоководных миссий, в которых имеет место длительный процесс заглужения АНПА, прежде чем он достигнет требуемой высоты над дном и станет возможной работа системы счисления пути относительно дна. При этом снос АНПА за время заглужения при наличии течений может составлять несколько сотен метров.

Предложены и исследованы подходы, а также несколько алгоритмов, позволяющих определить неизвестные координаты АНПА. В одном из подходов для определения текущего местоположения АНПА используются информация о его перемещении между двумя последовательными тактами работы ГАНС, а также координаты мобильного гидроакустического маяка и измеренные горизонтальные дистанции до него. Другой подход основан на использовании набора предполагаемых координат АНПА, мобильного маяка и измеренных дальностей до него, соответствующих  $n$  последовательным тактам работы ГАНС.

Наконец, последний из предложенных и исследованных подходов, который обладает наиболее высокой точностью, предполагает выполнение следующей процедуры. После завершения заглужения (непосредственно перед началом выполнения основной части миссии) АНПА зависает неподвижно над дном, используя информацию от системы технического зрения. Для высокоточной стабилизации АНПА в заданной точке предварительно фиксируется исходный кадр. Затем осуществляется сопоставление текущего и исходного изображений и выполняется расчет перемещения текущего кадра относительно исходного кадра. Ошибки определения перемещения подводного аппарата относительно исходного кадра в такой системе не превышают одного сантиметра.

Для определения местоположения АНПА выполняется движение мобильного маяка двумя прямолинейными галсами. Соотношение, связывающее параметры движения мобильного маяка на прямолинейном галсе с дальностями до неподвижного АНПА, имеет вид:

$$\left[ x_{b_0} + k v \tau \cos(\varphi) - x_a \right]^2 + \left[ y_{b_0} + k v \tau \sin(\varphi) - y_a \right]^2 + (z_{b_k} - z_a)^2 = t_k^2 c^2, \quad (1)$$

где  $(x_a, y_a)$  – горизонтальные координаты АНПА,  $(x_{b_0}, y_{b_0})$  – горизонтальные координаты начальной точки галса мобильного маяка,  $v$  – скорость его движения,  $\varphi$  – угол ориентации галса относительно направления на север,  $\tau$  – период работы ГАНС,  $k$  – номер такта работы ГАНС,  $z_{b_k}$  – глубина мобильного маяка в момент излучения  $k$ -го навигационного сигнала,  $z_a$  – известная глубина АНПА,  $c$  – эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде,  $t_k$  – время распространения навигационного сигнала, измеренное на  $k$ -ом такте работы ГАНС.

Соотношение (1) можно переписать в виде:

$$A k^2 + B k + C = t_k^2 c^2 - (z_{b_k} - z_a)^2, \quad (2)$$

где  $A = v^2 \tau^2$ ,  $B = 2 v \tau [(x_{b_0} - x_a) \cos(\varphi) + (y_{b_0} - y_a) \sin(\varphi)]$ ,  $C = (x_{b_0} - x_a)^2 + (y_{b_0} - y_a)^2$ .

Полагается, что эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде неизвестна, а ошибки в измерении времени распространения сигнала представляют собой центрированный гауссовский шум. Для оценки неизвестных параметров  $B$ ,  $C$  и  $c^2$  минимизируется сумма квадратов невязок  $J$ :

$$J = \sum_{k=1}^N \left[ A k^2 + B k + C + (z_{b_k} - z_a)^2 - t_k^2 c^2 \right]^2 E(k), \quad (3)$$

где  $E(k) = 1$ , если в  $k$ -ом цикле работы ГАНС был получен навигационный сигнал от маяка; в противном случае  $E(k) = 0$ . Дифференцируя (3), получаем систему уравнений относительно  $B$ ,  $C$  и  $c^2$ :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N \left[ A k^2 + B k + C + (z_{b_k} - z_a)^2 - t_k^2 c^2 \right] k E(k) = 0; \\ \sum_{k=1}^N \left[ A k^2 + B k + C + (z_{b_k} - z_a)^2 - t_k^2 c^2 \right] E(k) = 0; \\ \sum_{k=1}^N \left[ A k^2 + B k + C + (z_{b_k} - z_a)^2 - t_k^2 c^2 \right] t_k^2 E(k) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

После некоторых преобразований систему уравнений (4) можно привести к виду:

$$\begin{cases} c^2 \sum_{k=1}^N t_k^2 k E(k) - B K_2 - C K_1 = A K_3 + \sum_{k=1}^N (z_{b_k} - z_a)^2 k E(k); \\ c^2 \sum_{k=1}^N t_k^2 E(k) - B K_1 - C K_0 = A K_2 + \sum_{k=1}^N (z_{b_k} - z_a)^2 E(k); \\ c^2 \sum_{k=1}^N t_k^4 E(k) - B \sum_{k=1}^N t_k^2 k E(k) - C \sum_{k=1}^N t_k^2 E(k) = A \sum_{k=1}^N t_k^2 k^2 E(k) + \sum_{k=1}^N t_k^2 (z_{b_k} - z_a)^2 E(k); \end{cases} \quad (5)$$

где  $K_0 = \sum_{k=1}^N E(k)$ ,  $K_1 = \sum_{k=1}^N k E(k)$ ,  $K_2 = \sum_{k=1}^N k^2 E(k)$ ,  $K_3 = \sum_{k=1}^N k^3 E(k)$ .



Система (5) имеет единственное решение, на основе которого могут быть получены оценки квадрата эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде  $c^2$  и коэффициентов  $B$  и  $C$ . Для определения неизвестных координат АНПА имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_{b0} - x_a) \cos(\varphi) + (y_{b0} - y_a) \sin(\varphi) = \frac{B}{2v\tau}; \\ (x_{b0} - x_a)^2 + (y_{b0} - y_a)^2 = C. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) в общем случае имеет два симметричных относительно данного галса решения, одно из которых соответствует истинному местоположению АНПА. Для устранения неоднозначности и получения одного решения выполняются два галса (взаимно перпендикулярных для более точного оценивания) с последующим анализом полученных решений и формированием окончательной оценки местоположения АНПА.

Было выполнено моделирование работы предложенного алгоритма. При этом неизвестные координаты АНПА  $x_a$  и  $y_a$  задавались случайным образом в интервале  $(-200 \text{ м}; 200 \text{ м})$ , а глубина была принята равной 1000 м. Эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде также задавалась случайным образом в интервале  $(1460 \text{ м/с}; 1540 \text{ м/с})$  и считалась неизвестной.

Для оценки начальных координат АНПА и эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде моделировалось движение мобильного маяка в течение 5 минут курсом  $15^\circ$  со скоростью 4 м/с из точки с координатами  $(-600; -600)$ , по завершению данного галса осуществлялся разворот на курс  $105^\circ$ , после чего в течение 5 минут выполнялось движение вторым галсом. Период работы ГАНС составлял 5 с. Таким образом, на каждом галсе излучалось 60 навигационных сигналов. На рис. 1 представлена траектория движения мобильного маяка и обозначено положение неподвижного АНПА.

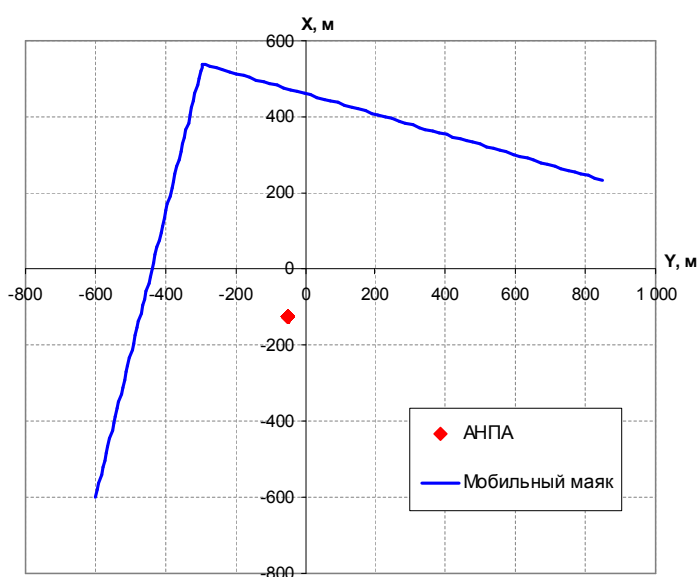


Рис. 1. Схема проведения модельного эксперимента.

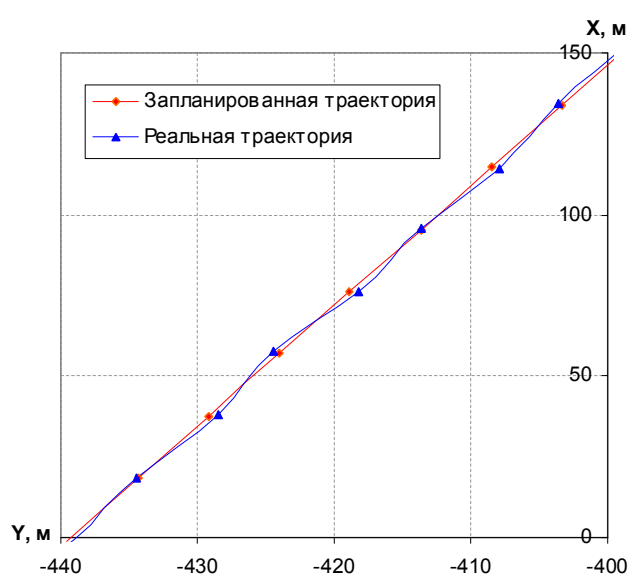


Рис. 2. Фрагменты траекторий движения мобильного маяка.

На практике в результате воздействия случайных факторов реальная траектория движения мобильного маяка отличается от программной траектории. В процессе моделирования программные координаты мобильного маяка в момент излучения навигационного сигнала искажались путем прибавления к каждой из координат шума – нормально распределенной случайной величины с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 0,5 м. На рис. 2 представлены фрагменты программной и искаженной траекторий движения мобильного маяка.

Измерения времени распространения навигационных сигналов зашумлялись нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 200 мкс.

В таблице 1 приведены результаты оценивания значений горизонтальных координат подводного аппарата и эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде для случая, когда истинные координаты АНПА были равны (–123,630 м, –49,959 м), а скорость распространения звукового сигнала составляла 1466,809 м/с. В ней показаны полученные оценки данных параметров в результате работы алгоритма на каждом из галсов. Окончательное решение получено как среднее арифметическое между двумя ближайшими решениями на первом и втором галсах.

Таблица 1. Оценки неизвестных параметров, полученные в результате моделирования работы описанного алгоритма.

| Описание                     |                | Координаты АНПА |                | Эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде, м/с |
|------------------------------|----------------|-----------------|----------------|--|
|                              |                | $x_a$ , м       | $y_a$ , м      |  |
| Галс №1<br>(курс 15°)        | Первое решение | –124,001        | –49,400        | 1467,023   |
|                              | Второе решение | 87,527          | –838,834       |  |
| Галс №2<br>(курс 105°)       | Первое решение | –121,984        | –49,131        | 1465,663   |
|                              | Второе решение | 991,537         | 249,236        |  |
| Окончательное решение        |                | <b>–122,992</b> | <b>–49,265</b> | <b>1466,343</b>  |
| Истинные значения параметров |                | –123,630        | –49,959        | 1466,809   |
| Ошибка оценивания            |                | –0,638          | –0,694         | 0,466  |

Из представленных результатов моделирования видно, что ошибка в оценке эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде составила 0,466 м/с, что соответствует относительной ошибке  $3,18 \cdot 10^{-4}$ . Ошибка в определении местоположения АНПА составила 0,943 м.

**В третьей главе** рассматривается задача обеспечения навигации АНПА в случае, когда текущая ошибка определения его местоположения невелика и справедлива линеаризация соотношений, связывающих координаты АНПА и результаты измерений дальностей до мобильного маяка. При этом исходная задача навигации сводится к задаче оценивания местоположение АНПА в процессе выполнения им миссии с помощью расширенного фильтра Калмана. При его

использовании координаты АНПА и степень точности их оценки описываются при помощи вектора состояния  $X$  и его ковариационной матрицы  $P$ .

Поскольку глубина движения АНПА достаточно точно измеряется датчиком давления, то для определения полного вектора его положения  $X$  необходимо определить оставшиеся две компоненты в горизонтальной плоскости.

Перемещение АНПА в промежутках времени между моментами получения навигационных сигналов от гидроакустического маяка определяется с помощью ССП на основе данных от доплеровского лага и датчика курса. К моменту времени  $t_k$  получения подводным аппаратом  $k$ -го навигационного сигнала его численное перемещение  $\Delta X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k]^T$  определяется по выражениями:

$$\Delta x_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} v(t) \cos \varphi(t) dt, \quad \Delta y_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} v(t) \sin \varphi(t) dt, \quad (7)$$

где  $v(t)$  – модуль скорости движения АНПА,  $\varphi(t)$  – курс АНПА (предполагается, что углы дифферента и крена малы, и ими можно пренебречь).

На этапе экстраполяции работы фильтра Калмана выполняется расчет предсказываемого вектора состояния  $\tilde{X}_k$  и его ковариационной матрицы  $\tilde{P}_k$ . Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки  $\hat{X}_{k-1}$  и  $\hat{P}_{k-1}$ , а также численный вектор перемещения АНПА  $\Delta X_k$  и его ковариационная матрица  $N_k$ . Пересчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$\tilde{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta X_k, \quad (8)$$

$$\tilde{P}_k = \hat{P}_{k-1} + N_k. \quad (9)$$

На этапе коррекции работы дискретного фильтра Калмана имеем:

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k [D_k - d(\tilde{X}_k, z_k)], \quad (10)$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) \tilde{P}_k, \quad (11)$$

где  $D_k$  и  $d(\tilde{X}_k, z_k)$  – измеренная и рассчитанная (ожидаемая) дальности между маяком и АНПА на  $k$ -ом такте работы навигационного алгоритма:

$$d(\tilde{X}_k, z_k) = \sqrt{(\tilde{x}_k - x_b)^2 + (\tilde{y}_k - y_b)^2 + (z_k - z_b)^2}, \quad (12)$$

$(x_b, y_b, z_b)$  – координаты маяка,  $z_k$  – глубина нахождения АНПА в момент получения  $k$ -го навигационного сигнала,  $K_k$  – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления, рассчитываемая в соответствии со следующим выражением:

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T [H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k]^{-1}; \quad (13)$$

где  $R_k$  – ковариационная матрица ошибок измерений дальностей;  $H_k$  – матрица частных производных функции измерения в точке  $\tilde{X}_k$ :

$$H_k = \left[ \frac{\partial d(X, z_k)}{\partial X} \right]_{X=\tilde{X}_k} = \frac{1}{\sqrt{(\tilde{x}_k - x_b)^2 + (\tilde{y}_k - y_b)^2 + (z_k - z_b)^2}} [\tilde{x}_k - x_b \quad \tilde{y}_k - y_b]. \quad (14)$$

После двух шагов работы алгоритма на основе предыдущей оценки координат АНПА  $\hat{X}_{k-1}$ , ее ковариационной матрицы  $\hat{P}_{k-1}$  и измерения дистанции до маяка  $D_k$  формируется текущая апостериорная оценка местоположения АНПА в горизонтальной плоскости  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k, \hat{y}_k]^T$  и ковариационная матрица  $\hat{P}_k$  для данной оценки. Знание ковариационной матрицы ошибок для оценки вектора состояния позволяет контролировать сходимость и устойчивость процесса оценивания.

В данной главе также рассмотрены метод и алгоритм формирования траектории движения мобильного гидроакустического маяка, обеспечивающий минимизацию ошибки определения местоположения АНПА. Предполагается, что после коррекции местоположения АНПА на основе информации о дальности до гидроакустического маяка область наиболее вероятного нахождения АНПА ограничена эллипсом. На рис. 3 изображены два положения АНПА и мобильного маяка, соответствующие двум последовательным тактам работы ГАНС, где  $A(x_A, y_A)_1$  и  $A(x_A, y_A)_2$  – положения АНПА,  $B(x_B, y_B)_1$  и  $B(x_B, y_B)_2$  – положения мобильного маяка.

После коррекции местоположения АНПА на основе информации о дальности  $R_1$  до гидроакустического маяка круг начальных погрешностей будет сжат в эллипс с радиально направленной малой осью. На рис. 3 для положения 1 показаны начальная область ошибки и область ошибки, полученная в результате коррекции местоположения АНПА на основе информации о дальности  $R_1$ .

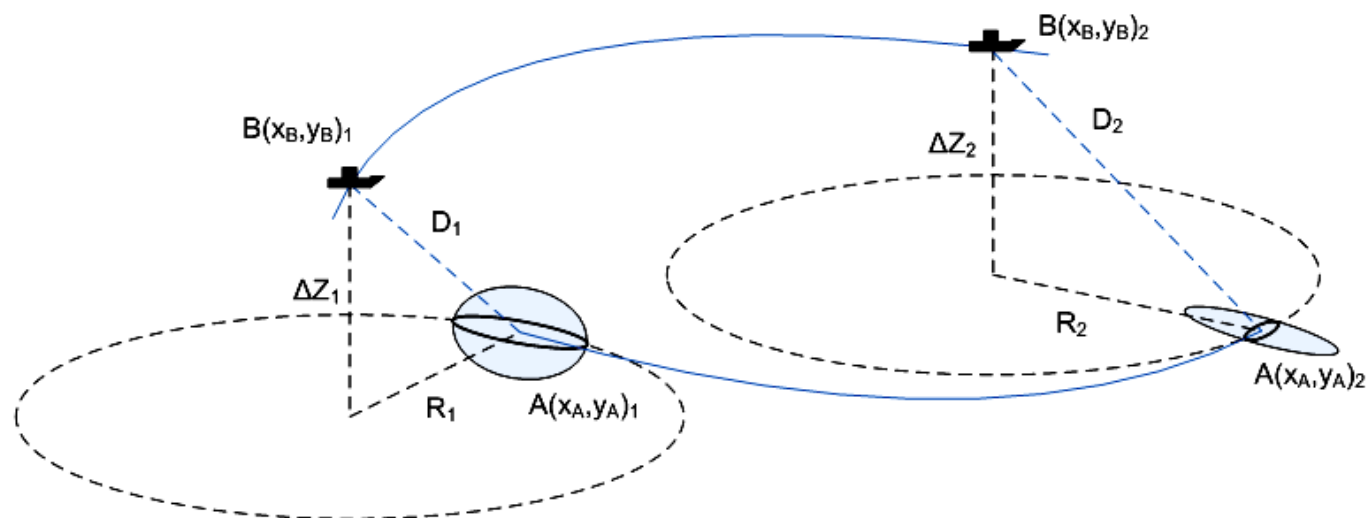


Рис. 3. Изменение эллипса ошибок при совместном движении АНПА и мобильного гидроакустического маяка.

Для обеспечения высокой точности навигации АНПА мобильному маяку на каждом такте работы ГАНС следует находиться в такой позиции, которая позволяла бы значительно уменьшить эллипс неопределенности. Максимальному уменьшению области неопределенности соответствует такой алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, при котором в каждый момент излучения навигационного сигнала он находится на большой оси эллипса ошибок (см. рис. 3).

Для реализации данного метода АНВА, осуществляющий транспортировку мобильного маяка, должен периодически по гидроакустическому каналу связи получать от АНПА пакет данных, включающий оценку его координат  $\hat{X}_k$ , соответствующую моменту времени  $t_k$ , числа  $(\sigma_{x,k}^2, \sigma_{y,k}^2, \sigma_{xy,k})$ , описывающие ковариационную матрицу ошибок определения координат  $\hat{P}_k$ , а также текущие курс  $\varphi_k$  и скорость  $v_k$  движения АНПА. На основе этих данных можно спрогнозировать местонахождение АНПА в последующий момент времени  $t_k + \Delta t$ :

$$\tilde{X}(t_k + \Delta t) = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \varphi_k \\ \sin \varphi_k \end{pmatrix} v_k \Delta t. \quad (15)$$

Элементы ковариационной матрицы  $\sigma_{x,k}^2$ ,  $\sigma_{y,k}^2$  и  $\sigma_{xy,k}$  позволяют определить ориентацию эллипса ошибок и вычислить угол  $\psi_k$  между его большой осью и осью  $Ox$ :

$$\psi_k = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\sigma_{xy,k}}{\sigma_{x,k}^2 - \sigma_{y,k}^2}, & \text{если } \sigma_{x,k}^2 > \sigma_{y,k}^2; \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\sigma_{xy,k}}{\sigma_{x,k}^2 - \sigma_{y,k}^2}, & \text{если } \sigma_{x,k}^2 < \sigma_{y,k}^2; \end{cases} \quad (16)$$

где в случае, когда  $\sigma_{x,k}^2 \approx \sigma_{y,k}^2$ , угол  $\psi_k$  принимается равным  $\pm \pi/4$  (в зависимости от знака  $\sigma_{xy,k}$ ).

Используя оценку (15) местоположения АНПА  $\tilde{X}(t_k + \Delta t)$  и найденный при помощи выражения (16) угол  $\psi_k$ , можно определить на плоскости  $Oxy$  прямую  $\ell$ , находясь на которой мобильный маяк позволит выполнить эффективное сжатие эллипса неопределенности местонахождения АНПА.

Поскольку с увеличением расстояния между АНПА и маяком ошибка определения наклонной дальности возрастает, в работе исследован вопрос определения горизонтальной дистанции между ними, для которой дисперсия ошибки определения этой дистанции минимальна.

Полагая, что глубины АНПА и мобильного маяка измеряются с достаточной точностью, а дисперсия ошибки измерения наклонной дальности от АНПА до маяка зависит от расстояния между ними в соответствии с выражением

$$\sigma_D^2 = d^2 + \alpha^2 D^2, \quad (17)$$

можно показать, что имеет место следующее соотношение для дисперсии ошибки определения горизонтальной дальности:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{R^2} (R^2 + \Delta z^2) \left[ d^2 + \alpha^2 (R^2 + \Delta z^2) \right], \quad (18)$$

где:  $\Delta z = z - z_b$  – разность глубин расположения АНПА и мобильного маяка;  $d$  – постоянная составляющая дисперсии ошибки определения наклонной дальности;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, описывающий скорость роста ошибки

определения наклонной дальности от АНПА до маяка с увеличением расстояния между ними.

Показано, что выражение для горизонтального удаления маяка от АНПА, минимизирующее дисперсию ошибки определения горизонтальной дальности, имеет вид:

$$R_{opt} = |\Delta z| \left( 1 + \frac{d^2}{\alpha^2 \Delta z^2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (19)$$

Для достаточно больших разностей глубин движения АНПА и мобильного маяка можно считать, что горизонтальное удаление маяка от АНПА, минимизирующее дисперсию ошибки определения горизонтальной дальности, определяется приближенным равенством:

$$R_{opt} \approx |\Delta z|. \quad (20)$$

На прямой  $\ell$ , совпадающей с большой осью эллипса ошибки, ориентация которой определяется выражением (16), имеются две точки, удовлетворяющие данному требованию:

$$T_{k1} = \tilde{X}(t_k + \Delta t) + \begin{pmatrix} \cos \psi_k \\ \sin \psi_k \end{pmatrix} R_{opt}, \quad T_{k2} = \tilde{X}(t_k + \Delta t) - \begin{pmatrix} \cos \psi_k \\ \sin \psi_k \end{pmatrix} R_{opt}. \quad (21)$$

Предполагается, что АНПА, осуществляющий транспортировку мобильного маяка, получив от АНПА по гидроакустическому каналу связи пакет с описанными выше данными, вычисляет координаты данных точек и выполняет движение к ближайшей из них.

На рис. 4 представлены результаты моделирования работы алгоритма формирования траектории движения мобильного гидроакустического маяка для случая равномерного прямолинейного движения АНПА со скоростью  $v = 1.0$  м/с на постоянной глубине 500 м в течение 6 часов. Максимальная скорость движения маяка составляла 4 м/с. Маркерами отмечены целевые и фактические положения маяка, соответствующие моментам излучения навигационных сигналов.

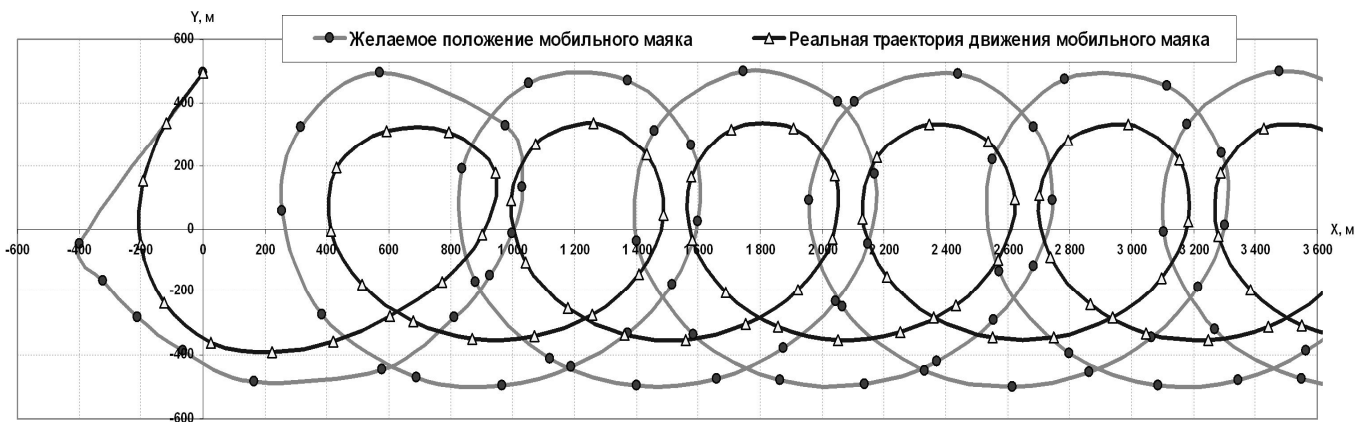


Рис. 4. Программная и фактическая траектории движения мобильного маяка.

В процессе моделирования измерения наклонной дальности между АНПА и маяком зашумлялись нормально распределенной случайной величиной с нулевым

средним и среднеквадратическим отклонением 0,1% от истинного значения дистанции. Измерения компонент скорости движения АНПА искажались путем прибавления к программным значениям шума, представляющего собой нормально распределенные случайные величины с постоянным смещением 2 мм/с и среднеквадратическим отклонением 5 см/с. Период работы ССП составлял 0,1 с, а период работы ГАНС был принят равным 30 с.

На рис. 5 приведен график изменения ошибки определения местоположения АНПА в течение 6-часовой миссии.

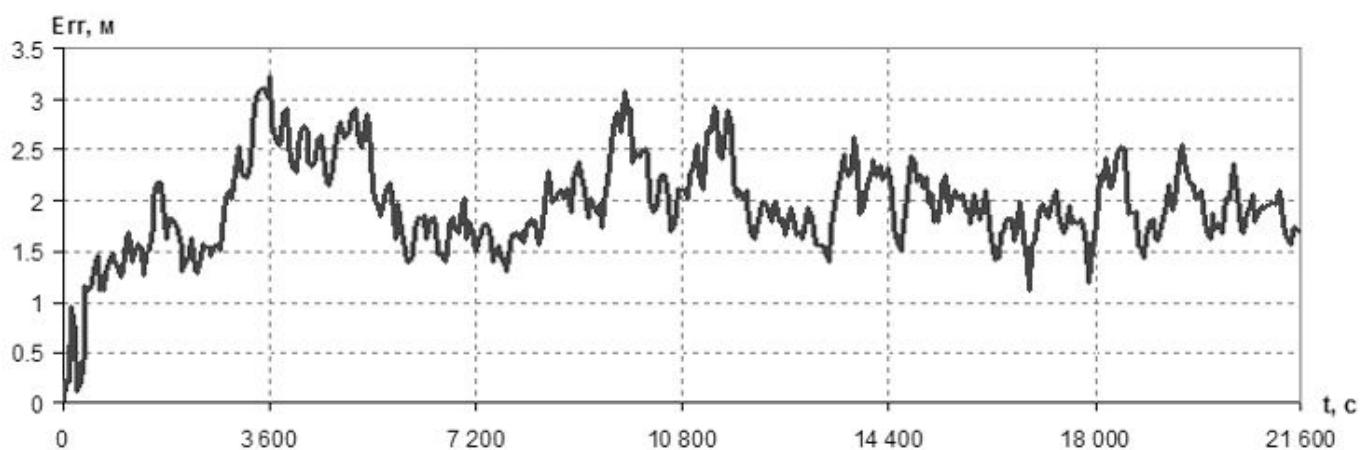


Рис. 5. График изменения ошибки определения координат АНПА.

Из рис. 5 следует, что для данных условий эксперимента (дистанции между АНПА и мобильным маяком составляют около 700 м), максимальное значение ошибки не превышает 3,5 м.

**В четвертой главе** рассмотрен алгоритм автоматического приведения АНПА к гидроакустическому маяку, использующий данные от системы счисления пути и информацию о дальности до маяка.

Для обеспечения продолжительной работы АНПА он в автоматическом режиме должен подходить с удаленного расстояния к оснащенным гидроакустическими маяками донной доковой станции или поверхностному бую и осуществлять стыковку с ними для подзарядки аккумуляторов, передачи накопленных данных и получения нового задания. При этом предполагается, что местоположение доковой станции или поверхностного бую заранее неизвестно.

Для формирования траектории движения АНПА к маяку используется информационно-вероятностный подход, заключающийся в определении точки наиболее вероятного местонахождения маяка путем постепенного уточнения его положения по мере получения измерений дальности до него в процессе движения АНПА. Для этого весь район возможного местонахождения маяка разбивается на равные квадраты. Для произвольного квадрата, центр которого имеет координаты  $(x, y)$ , определяется событие  $A_{x,y}$ , состоящее в нахождении маяка в данном квадрате, а также вероятность  $P(A_{x,y})$  нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$ .

В начале процедуры приведения нахождение гидроакустического маяка в каждом из квадратов принимается равновероятным. Пересчет вероятностей нахождения маяка в том или ином квадрате после получения нового измерения

горизонтальной дальности осуществляется при помощи формулы Байеса, которая на основе имеющихся априорных вероятностей позволяет рассчитать апостериорную вероятность нахождения маяка в квадрате  $(x, y)$  после возникновения события  $B_R$ , состоящего в получении нового измерения горизонтальной дальности  $R$ . Плотность вероятности  $p(B_R | A_{x,y})$  рассчитывается на основе модельной функции, аппроксимирующей реальную функцию распределения вероятностей ошибок. При этом полагалось, что ошибка измерения горизонтальной дальности до маяка является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ .

Положение наибольшего элемента в пересчитанной матрице определяет квадрат, в котором нахождение маяка является наиболее вероятным. После этого формируется такое управление АНПА, которое обеспечивало бы его движение в точку  $(\hat{x}, \hat{y})$ , соответствующую центру найденного квадрата.

**В пятой главе** описана структура комплексированной системы навигации в составе АНПА «МАРК», включающей бортовую автономную навигационную систему и ГАНС СДБ, использующую один мобильный маяк. Работа данной навигационной системы основана на использовании модемов S2C R 18/34 (EvoLogics), предназначенных для обеспечения гидроакустической цифровой передачи данных и определения дистанции между АНПА и маяком. В состав системы входят два модема, один из которых интегрирован с гидроакустической антенной АНПА, а другой – с гидроакустической антенной АНВА. Особенностью комбинированной системы является возможность одновременной работы систем навигации и связи. В качестве измерителя курса, крена, дифферента и угловых скоростей курса и дифферента используется инерциальное измерительное устройство MTi Xsens (Xsens Technologies).

В процессе выполнения задания АНПА и АНВА поочередно обмениваются навигационными данными, на основе которых АНПА определяет свое местоположение, а АНВА отслеживает траекторию движения АНПА. Информационная посылка от АНВА содержит координаты гидроакустической антенны, рассчитанные с использованием данных от DGPS. Навигационная программа рассчитывает координаты АНПА на основе обработки данных от нескольких устройств: GPS (при нахождении АНПА на поверхности), инерциального измерительного модуля, доплеровского лага и гидроакустической навигационной системы. Структура комплексированной навигационной системы представлена на рис. 6.

На борту АНПА рассчитываются его координаты на основе полученной в течение нескольких тактов работы ГАНС СДБ информации о положении маяка и измеренных дальностях между ним и АНПА. Эти координаты вместе с измерениями скорости, курса и глубины движения АНПА передаются им на АНВА в ответной информационной посылке. Гидроакустическая навигационная система одновременно обеспечивает навигацию нескольких АНПА в одной акустической сети. При этом каждый подводный аппарат не только определяет свое местоположение, но также может отслеживать положение других АНПА в рабочей области.





Рис. 6. Структура комплексированной навигационной системы АНПА «МАРК».

Работоспособность отдельных элементов навигационной системы в составе АНПА «МАРК» подтверждена во время морских испытаний данного подводного аппарата, выполненных в заливе Петра Великого Японского моря с использованием научно-исследовательского судна «Юрий Молоков».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод, позволяющий с требуемой точностью оценивать местоположение АНПА на основе использования одного мобильного гидроакустического маяка.

2. Разработан метод формирования траектории движения мобильного гидроакустического маяка, обеспечивающий повышение точности навигации подводного аппарата.

3. Разработан алгоритм автоматического приведения АНПА к гидроакустическому маяку с неизвестными координатами, использующий информацию о дальностях между АНПА и маяком, а также данные от бортовой системы счисления пути подводного аппарата.

4. Разработана структура системы одномаяковой навигации, которая внедрена на борту АНПА «МАРК». Разработанное алгоритмическое обеспечение реализовано в виде программных модулей, которые интегрированы и протестированы в составе предложенной системы одномаяковой навигации АНПА «МАРК».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Щербатюк А.Ф., Дубровин Ф.С. Алгоритмы определения местоположения АНПА на основе информации о дальности до одного мобильного гидроакустического маяка // **Информационно-измерительные и управляющие системы.** – 2012. – №9. – С. 26-39.
2. Дубровин Ф.С. Об одном алгоритме автоматического приведения автономного необитаемого подводного аппарата к гидроакустическому маяку // **Приборы.** – 2012. – №4. – С. 28-34.
3. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций // **Мехатроника, автоматизация, управление.** – 2012. – №6. – С. 59-65.
4. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Система бортового управления и навигации малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613759 от 13.05.2011 г.
5. Мун С.А., Дубровин Ф.С., Непостаев Е.И., Сенченко А.В., Сураев Н.В., Дубовой Ю.Р., Коваленко А.А. Разработка элементов системы программного управления автономного необитаемого подводного аппарата на основе ОС Linux // **Материалы Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике.** – Владивосток, 2010. – С. 168-169.
6. Denisenko M., Dubrovin F., Mun S., Nepostaev E., Suraev N., Tuphanov I., Vaulin Y. Control System of Small AUV for Multiple Vehicle Operation // **Proceedings of the international conference and exhibition «Underwater Intervention 2011».** – New Orleans, USA, 2011. – P. 1-5.
7. Дубровин Ф.С. Об одном алгоритме приведения автономного необитаемого подводного аппарата к гидроакустическому маяку // **Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана».** – Владивосток, 2011. – С. 420-425.
8. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов одномаяковой навигации АНПА // **Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана».** – Владивосток, 2011. – С. 411-419.
9. Дубровин Ф.С., Непостаев Е.И., Сураев Н.В., Денисенко М.В., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Навигационно-управляющий комплекс автономного необитаемого подводного аппарата для выполнения групповых операций // **Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Локальная научно-техническая конференция «Управление в распределенных сетцентрических и мультиагентных системах».** – Геленджик, 2011. – С. 346-350.
10. Дубровин Ф.С., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат для выполнения групповых операций на шельфе // **Материалы XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований».** – Москва, 2011. – Т. 2 – С. 66-69.

11. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.Ph. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proceedings of the IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. – Porto, Portugal, 2012. – P. 1-6.

12. Dubrovin F.S. Research of Single Mobile Acoustic Beacon Motion Algorithm for Accurate AUV Navigation // Proceedings of the Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS). – Vladivostok, Russia, 2012. – P. 176-180.

**Личный вклад автора.** Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В совместных работах [1, 8, 11] автором разработаны методы и алгоритмы одномаяковой навигации АНПА, осуществлена их реализация в виде структуры системы и программного обеспечения и выполнено компьютерное моделирование; в работе [4] автору принадлежит реализация разработанных методов и алгоритмов одномаяковой навигации в составе системы программного управления и навигации АНПА «МАРК»; в работах [3, 5, 6, 9, 10] автору принадлежат материалы, касающиеся разработанной структуры системы одномаяковой навигации и ее реализации на борту АНПА «МАРК».

Дубровин Федор Сергеевич

Разработка методов и алгоритмов одномаяковой навигации  
автономных необитаемых подводных аппаратов

Автореферат

|                               |                |                |
|-------------------------------|----------------|----------------|
| Подписано к печати 08.05.2013 | Усл.п.л. 1.0   | Уч.-изд.л. 0.8 |
| Формат 60x84/16               | Тираж 100 экз. | Заказ _____    |

---

Издано ИАПУ ДВО РАН. г. Владивосток, ул. Радио, 5  
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН  
г. Владивосток, ул. Радио, 5