УДК 551.46.077:629.584

# О МЕТОДЕ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ ОДНОМАЯКОВОЙ МОБИЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ВОДНОГО АППАРАТА, ОСНАЩЕННОГО DGPS

Ф.С. Дубровин<sup>1</sup>, А.Ф. Щербатюк<sup>1,2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup>

Одним из основных элементов мобильного навигационного комплекса для автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) является гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой. Принцип действия данной системы основан на использовании одного навигационного маяка, буксируемого обеспечивающим судном или автономным необитаемым водным (движущимся по поверхности моря) аппаратом (АНВА). При работе системы с помощью модемной гидроакустической связи производится обмен пакетами навигационных данных между АНПА и мобильным маяком и измеряется время распространения акустического сигнала между ними. Навигационная привязка разработанной системы обеспечивается с помощью DGPS, мобильная часть которой установлена на АНВА. Для определения местоположения АНПА используются два вида навигационной информации: информация о дальности до мобильного гидроакустического маяка и данные системы счисления пути АНПА. Для оценки точности навигационного комплекса производится сравнение алгоритмов, основанных на расширенном фильтре Калмана и фильтре частиц. Результаты морских испытаний разработанной гидроакустической навигационной системы с синтезированной длинной базой в составе морского робототехнического комплекса МАРК, включающего АНПА и АНВА, подтверждают ее работоспособность и демонстрируют достаточно высокую точность ее работы.

## введение

Важной задачей при разработке АНПА является достижение высокой мобильности и требуемой точности навигационного обеспечения. Система счисления пути (ССП), в состав которой входят доплеровский лаг и датчики угловой ориентации АНПА, обычно составляет основу навигационной системы АНПА. ССП свойственно постепенное накопление ошибок. входящих в измерения навигационных датчиков. Ошибки в определении местоположения могут составлять от нескольких десятков до сотен метров за час работы, в зависимости от точности используемых датчиков. При этом миссия АНПА может иметь продолжительность от нескольких десятков часов до нескольких суток.

Для обеспечения требуемой точности навигации АНПА, которая может составлять 1–10 м, необходимо периодически в процессе выполнения миссии осуществлять коррекцию счисленных координат. Данные GPS обычно используются для определения местоположения АНПА перед погружением и после всплытия. Для уменьшения накапливающейся ошибки счисления наиболее широкое распространение получили гидроакустические навигационные системы с длинной базой (ГАНС ДБ) [1, 2].

В зависимости от размера зоны, в которой работает объект,

период работы ГАНС ДБ может лежать в интервале от нескольких секунд до нескольких минут. Ошибка определения положения движущегося объекта в данном случае зависит от точности определения координат акустического маяка, знания эффективной скорости звукового сигнала в воде для перевода временных задержек распространения сигнала в дальности и точности фиксации моментов прихода сигналов от акустического маяка.

Использование ДБ ГАНС предполагает развертывание и калибровку сети придонных маяков

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: (423) 221-55-45. E-mail: <u>f\_dubrovin@mail.ru</u>. <sup>2</sup> E-mail: alex-scherba@yandex.ru.

перед началом выполнения работ, а также их подъем по завершении работ. Данные операции могут занять до нескольких суток, и 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.

Олним из способов повышения мобильности навигационного комплекса является использование сети гидроакустических маяков, движущихся по поверхности моря и определяющих свое местоположение с помощью GPS [3-6]. Другим. более экономичным, способом создания мобильного навигационного комплекса для АНПА является разработка гидроакустической навигационной системы с синтезированной длинной базой (ГАНС СДБ). Основная идея его состоит в использовании елинственного мобильного навигационного маяка, буксируемого обеспечивающим судном или необитаемым автономным водным аппаратом (рис. 1). Работа навигационных систем данного



Рис. 1. Мобильный навигационный комплекс АНПА с одним гидроакустическим маяком

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 [7–10].

В настоящее время ведущими разработчиками морских робототехнических систем признано важным и актуальным создание комплексов, включающих автономные необитаемые подводные и водные аппараты и реализующих мобильную подводную навиганию. Основными областями использования таких комплексов АНПА и АНВА могут быть картографирование дна, поиск затонувших объектов, обследование протяженных объектов (подводных трубопроводов и кабелей), экологический мониторинг, оценка запасов биоресурсов.

Работы по созданию комплекавтономных необитаемых COB подводного и водного аппаратов интенсивно ведутся за рубежом. В частности, в Массачусетском технологическом институте подобный комплекс разрабатывается на основе АНПА «Bluefin» и автономного каяка, оснащенного необходимым оборудованием для связи и навигации. В Лиссабонском техническом институте подобный комплекс создается на базе АНВА ROAZ и АНПА MARES. Близкие работы ведутся и в ряде других мировых центров подводной робототехники (MBARI (USA), WHOI (USA), IFREMER (FRANCE), ATLAS (GERMANY) и др.). Один из последних европейских проектов МОRPH [11] посвящен отработке совместных операций с использованием группы АНВА и АНПА. Летом с 22 по 26 июля 2013 года в Тулоне были проведены испытания, в которых

приняли участие девять организаций из пяти стран (Германии, Португалии, Италии, Франции и Испании). Проводились эксперименты, в которых вместе с АНВА одновременно работали до пяти разнородных АНПА.

Существует несколько подходов к разработке алгоритмов решения навигационной задачи в системе с синтезированной длинной базой. Наиболее распространенным является использование расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) [12-13], однако его применение ограничено в случае, когда начальная ошибка определения местоположения велика. В этой ситуации используют другие методы, например, метод максимального правдоподобия [7-8], последовательный метод Монте-Карло (sequential Monte Carlo method), который иначе называют фильтром частиц (Particle filter) [14], а также алгебраический метод [15]. Геометрический подход для решения данной задачи описан в работе [16], при этом процесс локализации состоит в построении области, ограничивающей возможные положения АНПА, и выполнении некоторых операций над областями. В статьях [17-18] предложены и исследованы несколько алгоритмов, предназначенных для решения указанной задачи в общем случае.

Данная работа посвящена вопросу исследования точности ГАНС, основанной на использовании одного мобильного гидроакустического маяка, установленного на АНВА. Для определения с требуемой точностью текущего местоположения мобильного маяка транспортирующий его АНВА оборудован комбинированным приемником спутниковой навигационной системы (GPS и ГЛО-НАСС). С использованием модемной гидроакустической связи АНПА и АНВА обмениваются пакетами данных, а также определяют взаимную дальность на основе измеряемого времени распространения акустического сигнала.

В части 1 статьи представлен состав комплекса, приведено краткое описание входящих в него АНПА и АНВА. Вопросы организации систем программного управления и навигации робототехнического комплекса рассмотрены в частях 2 и 3. Метод оценивания точности и результаты морских испытаний, полученные с использованием морского робототехнического комплекса МАРК, включающего АНПА и АНВА, приведены в части 4.

## 1. Состав морского интеллектуального робототехнического комплекса МАРК

В состав робототехнического комплекса МАРК кроме АНПА и АНВА входит оборудование берегового центра управления [19]. АНПА, входящий в данный комплекс (рис. 2), имеет массу около 50 кг и предназначен для решения широкого круга задач на глубинах до 200 м. Основные его технические характеристики приведены в табл. 1.

В состав АНПА входят непосредственно носитель и информационно-измерительная система. Носитель включает корпусную конструкцию, движитель-



Puc. 2. АНПА МАРК, входящий в морской автономный робототехнический комплекс

но-рулевой комплекс (ДРК), систему энергообеспечения, систему программного управления и контроля, навигационный комплекс, средства связи и средства обнаружения подводного аппарата. Конструкция АНПА включает негерметичные носовой и кормовой отсеки и герметичный центральный отсек, в котором размещена цифровая система программного управления. На нем также установлены антенны гидролокатора бокового обзора (рис. 2). В носовой части расположены системы радиосвязи, приемник GPS, датчики солености, температуры и давления, а также доплеровский лаг. Длина носовой части аппарата является переменной и зависит от устанавливаемого на аппарат дополнительного пользовательского оборудования.

Кормовая часть АНПА МАРК включает антенну гидроакусистической навигационной стемы и системы связи, а также движительно-рулевой комплекс. который состоит из четырех маршевых движителей с фиксированным положением. Каждый движитель включает электронный блок управления и бесколлекторный двигатель с 3-лопастным винтом. Движительный комплекс обеспечивает максимальную скорость движения аппарата около 2,5 м/с. Для обнаружения подводного аппарата используются проблесковый светомаяк (на поверхности моря) и гидроакустический пингер

#### Таблица 1. Тактико-технические характеристики АНПА МАРК

Максимальная рабочая	200
глубина погружения, м	
Масса, кг	50
Длина, мм	1800
Диаметр корпуса, мм	230
Максимальная скорость, м/с	2,5
Автономность (при скорости	18
хода 1 м/с), ч	
Пробег, км	65



Puc. 3. АНВА МАРК, входящий в морской автономный робототехнический комплекс

(в толще воды). При этом на поверхности моря система радиосвязи обеспечивает передачу на дистанции до 5 км координат АНПА, полученных от GPS.

АНВА, входящий в рассматриваемый комплекс, представляет собой движущийся по поверхности автономный аппарат катамаранного типа (рис. 3). В его состав входят поплавки, обеспечивающие необходимую плавучесть комплекса. Поплавки устанавливаются на рамную конструкцию, собранную из алюминиевых труб диаметром 40 мм. К раме крепятся радио- и GPSантенны, панели солнечных батарей и прочее оборудование (устройство стыковки, дополнительные датчики). В поплавках носителя встроены отсеки для блоков электроники и аккумуляторных батарей. Поплавки АНВА изготовлены из вспененного пенополистирола плотностью 20 кг/м3. Каждый бортовой поплавок имеет положительную плавучесть около 80 кг. Масса АНВА составляет около 55 кг. Основные его технические характеристики привелены в табл. 2.

### Таблица 2. Тактико-технические характеристики АНВА МАРК

Остаточная плавучесть, кг	160
Масса, кг	55
Длина (с выступающими	2700
движителями), мм	
Ширина, мм	1520
Максимальная скорость, м/с	3
Автономность (при скорости	13.5
хода 2.5 м/с), ч	
Пробег (при скорости хода	120
2.5 м/с), км	

ДРК АНВА включает два маршевых движителя «Torqeedo Ultralight», которые устанавливаются в кормовой части носителя на поплавки. Каждый движитель имеет свой электронный блок управления. В движителях «Torgeedo» используются электромоторы бесколлекторного типа, что обеспечивает их высокую надежность. Каждый движитель имеет индивидуальную аккумуляторную батарею, которая подзаряжается от солнечных панелей. Это позволяет в светлое время суток существенно увеличить автономность АНВА.

В состав оборудования берегового центра управления входят пост оператора и навигатора комплекса, а также рабочее место для оперативной обработки получаемой информации. Указанный комплекс предназначен для работы в автоматическом режиме в соответствии с введенной перед его запуском программой-заданием (миссией). АНВА и АНПА объединены единой распределенной интеллектуальной системой управления и навигации. Если в процессе работы возникнет необходимость, то оператор имеет возможность перевести комплекс на ручное управление и в телеуправляемом режиме выполнить детальное обследование обнаруженных объектов. Режимы автоматического и супервизорного управления могут произвольно чередоваться по командам оператора в зависимости от характера текущих работ, выполняемых комплексом.

## 2. Система программного управления комплекса МАРК

Цифровые системы программного управления (СПУ) каждого отдельного аппарата комплекса однотипны и основаны на локальной вычислительной сети (ЛВС) с программным обеспечением, которая включает РС-совместимый бортовой компьютер и набор микроконтроллеров (рис. 4).

Бортовой компьютер предназначен для реализации системы управления и навигации аппарата, выполнения программы-задания, обеспечения работы также a информационно-измерительного комплекса. Микроконтроллеры предназначены для управления работой отдельных устройств и систем аппарата, предобработки данных и обеспечения их связи с бортовым компьютером. Локальная сеть включает линию Ethernet и несколько сегментов последовательных интерфейсов RS-232 (485), USB и CAN.

Когда АНПА находится на поверхности моря, связь между АНПА, АНВА и постом операто-

ра осуществляется посредством радиомодема со скоростью до 115 кБод. Обмен информацией между находящимся в подводном положении АНПА и АНВА выполняется по гидроакустическому каналу. Система гидроакустической связи действует под водой на дистанциях до 3,5 км.

Система программного управления предназначена для:

• выполнения программы-задания (миссии) каждого аппарата,

• управления системами аппаратов во всех режимах.

• загрузки миссии каждого аппарата и ее тестирования перед запуском,

• информационного обмена с постом оператора и другими подводными аппаратами,

• контроля состояния (диагностики) систем аппарата в процессе выполнения миссии,



Рис. 4. Структурная схема ЛВС АНПА

• считывания накопленной информации после завершения миссии.

Структура СПУ состоит из постоянной и переменной частей. Постоянная часть включает программу «менеджер миссии», программу управления движением, навигационную программу, бортовой архиватор данных и программу диагностики. Переменная часть представляет собой программузадание (миссию) для текущего запуска. Для управления устройствами используется набор управляющих программ – драйверов. Драйвер осуществляет связь с устройством посредством последовательного протокола через RS-232 или USB-порты.

Для передачи сообщений как между параллельно работающими процессами, реализующими указанные выше программные модули, так и для связи между отдельными аппаратами и постом оператора используется механизм IPC. С его помощью осуществляется обмен по принципу «публикатор-подписчик». Каждый процесс имеет возможность публиковать в системе пакеты с данными, а также подписываться на получение интересующих сообщений и использовать содержащиеся в них данные. Предусмотрена ситуация, когда один аппарат может полностью захватывать управление другим, вплоть до формирования упоров на его движители. Драйверы также имеют возможность получать и публиковать ІРС-сообщения.

В процессе обмена сообщениями между отдельными аппаратами и с постом оператора драйвер модема системы радио- или гидроакустической связи, получив локальное IPC-сообщение для отправки на другой узел, формирует на его основе байтовый поток и осуществляет его передачу. На принимающей стороне драйвер модема из получаемого потока байтов формирует исходное IPC-сообщение и публикует его в своей сети. Все программное обеспечение работает под управлением OC Linux.

Процесс «менеджер миссии» служит для управления миссией. Он получает команды с поста управления оператора о загрузке новой миссии и готовит ее к выполнению. На него также возложены функции приостановки или восстановления миссии, отмены текущего задания, полной отмены или смены миссии. Миссия представляет собой программу, содержащую вызовы специальных функций - команд управления аппаратом, которые делятся на три класса: команды управления движением, команды управления бортовыми устройствами, команды запроса данных.

Вызов команды управления движением для каждого аппарата сводится к заполнению специальной структуры с параметрами движения и ее публикации. На это сообщение подписана программа управления движением, которая вычисляет упоры движителей с учетом данных о текущем состоянии и местоположении. Когда желаемые параметры движения достигнуты, программа управления движением посылает сообщение «Команла выполнена». Получив его, менеджер миссии продолжает дальнейшее выполнение программы-задания. Контроль достижения цели может осуществляться по времени (команда движения в заданном направлении в течение определенного времени), по координатам, глубине или высоте (для АНПА) или другому условию. Диагностика подсистем отдельных аппаратов в режиме реального времени также реализована в виде отдельного процесса.

#### 3. Структура и алгоритмы работы навигационной системы робототехнического комплекса МАРК

Как отмечалось выше, при разработке робототехнического комплекса МАРК одной из основных целей была реализация мобильного навигационного обеспечения АНПА. Для комплекса разработана ГАНС СДБ, использующая в качестве единственного мобильного навигационного маяка гидроакустическую антенну, транспортируемую АНВА. Структурная схема системы навигации показана на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема навигационного обеспечения робототехнического комплекса, включающего АНПА и АНВА

В процессе выполнения задания АНПА и АНВА посредством модемной акустической связи 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 GPS (ГЛОНАСС или DGPS). Основными задачами АНВА в робототехническом комплексе являются навигационное обеспечение работы АНПА и организация связи между АНПА и наземным пунктом управления.

Поскольку глубина АНПА может быть измерена непосредственно с достаточно высокой точностью при помощи датчика давления, то оценивать требуется только координаты АНПА в горизонтальной плоскости. ССП осуществляет счисление координат АНПА на основе данных от доплеровского лага и датчика курса в промежутках времени между моментами получения навигационных сигналов от гидроакустического маяка.

Один из подходов, применяемых в системе для коррекции местоположения АНПА с использованием данных о дальностях между АНПА и АНВА, получаемых от СДБ ГАНС, основан на реализации расширенного фильтра Калмана. При этом координаты АНПА и степень точности их оценки описываются при помощи вектора состояния X и его ковариационной матрицы P.

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 счисленный вектор перемещения АНПА  $\Delta X_k$  и его ковариационная матрица  $N_k$ . Пересчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$\widetilde{X}_{k} = \widehat{X}_{k-1} + \Delta X_{k},$$

$$\widetilde{P}_{k-1} + N_{k}.$$
(1)
(2)

На этапе коррекции работы дискретного фильтра Калмана имеем:

$$\hat{X}_{k} = \tilde{X}_{k} + K_{k} [D_{k} - d(\tilde{X}_{k}, z_{k})], \quad (3)$$
$$\tilde{P}_{k} = \hat{P}_{k-1} + N_{k}, \quad (4)$$

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

$$d(X_{k}, z_{k}) = \sqrt{\left(\tilde{x}_{k} - x_{b}\right)^{2} + \left(\tilde{y}_{k} - y_{b}\right)^{2} + \left(z_{k} - z_{b}\right)^{2}},$$
(5)

 $(x_{b'} y_{b'} z_{b})$  – 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:

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T \left[ H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k \right]^{-1}, \quad (6)$$

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

$$H_{k} = \left[\frac{\partial d\left(X, z_{k}\right)}{\partial X}\right]_{X=\tilde{X}_{k}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\tilde{x}_{k} - x_{b}\right)^{2} + \left(\tilde{y}_{k} - y_{b}\right)^{2} + \left(z_{k} - z_{b}\right)^{2}}} \times \left[\tilde{x}_{k} - x_{b} \quad \tilde{y}_{k} - y_{b}\right].$$
(7)

В результате 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  $D_k$  формируются 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.

Другим подходом к получению оценки местоположения АНПА является использование фильтра частиц, в рамках которого распределение вероятностей возможного местонахождения АНПА описывается при помощи набора точек  $\{X_1,...,X_N\}$  (так называемых частиц), каждая из которых имеет некоторый вес  $\omega_i$ .

Работа алгоритма состоит из нескольких шагов:

1) инициализация. На основе имеющейся априорной информации генерируется набор из N частиц с равными весами, расположенных на плоскости случайным образом в области возможного нахождения АНПА. Инициализация фильтра может быть произведена разными способами:

• точки с равными весами распределяются в некотором кольце, центр которого находится в точке нахождения гидроакустического маяка, средний радиус кольца соответствует горизонтальной дальности от маяка до АНПА, а ширина кольца выбирается с учетом точности измерения дальности при помощи ГАНС;

 точки с равными весами распределяются в некотором круге, центр которого находится в точке погружения АНПА, координаты которой фиксируются с помощью приемника спутниковой навигации, а радиус круга выбирается с учетом возможного неконтролируемого дрейфа АНПА за время погружения вследствие наличия течений;  обновление. На основе информации от бортовой системы счисления пути осуществляется перемещение облака точек с добавлением к вектору перемещения каждой частицы случайной ошибки;

3) коррекция. При получении измерения дальности до гидроакустического навигационного маяка осуществляется пересчет весов частиц, учитывающий их предыдущие веса и степень соответствия координат частиц полученным измерениям дальностей до них;

4) регенерация частиц. В процессе длительной работы фильтра лишь небольшое число частиц будет иметь существенно отличные от нуля веса: большинство частиц вырождаются (их веса уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми). В связи с этим после каждого этапа коррекции определяется эффективное число частиц в соответствии с выражением:

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i^2}.$$
 (8)

Если эффективное число частиц меньше заданного порога  $N_{th}$ , то необходимо производить процедуру регенерации частиц, состоящую в удалении вырожденных частиц и насыщении области наиболее вероятного положения АНПА новыми частицами. Частицы, имеющие малые веса, удаляются, и вместо них создаются новые частицы, которые распределяются в некоторой области вокруг оставшихся частиц пропорционально их весам.

В качестве оценки местоположения подводного аппарата выбираются либо координаты частицы с максимальным весом, превышающим заданный порог, либо среднее взвешенное значение координат всех частиц:

$$\overline{\mathbf{X}} = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{X}_{i} \boldsymbol{\omega}_{i} \quad . \tag{9}$$

В качестве показателя, характеризующего точность оценивания и формирующего эллипс ошибок, используется ковариационная матрица, рассчитываемая для имеющегося облака частиц в соответствии с выражением:

$$P = \begin{pmatrix} p_x & p_{xy} \\ p_{xy} & p_y \end{pmatrix} = \\ = E \Big[ (\mathbf{X} - \mathbf{E}\mathbf{X}) (\mathbf{X} - \mathbf{E}\mathbf{X})^{\mathrm{T}} \Big] =$$
(10)  
$$= \sum_{i=1}^{N} \omega_i (\mathbf{X}_i - \overline{\mathbf{X}}) (\mathbf{X}_i - \overline{\mathbf{X}})^{\mathrm{T}}.$$

Важным является вопрос формирования траектории движения АНВА относительно АНПА. Для обеспечения высокой точности навигации АНПА мобильному маяку на каждом такте работы ГАНС следует находиться в такой точке, которая бы позволяла значительно уменьшить эллипс неопределенности его местоположения. 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.

Для реализации данного алгоритма автономный необитаемый водный аппарат, транспортирующий гидроакустический маяк, периодически по гидроакустическому каналу связи должен получать от АНПА пакет данных, включающий оценку его координат, ковариационную матрицу ошибок координат, а также текущие курс и скорость движения АНПА. С использованием этих данных оценивается местоположение АНПА в момент времени, соответствующий следующему циклу ГАНС, а на основе полученных элементов матрицы ковариационной pacсчитывается ориентация эллипса ошибок и вычисляется направление его большой оси. Используя оценку местоположения АНПА и направление большой оси эллипса ошибок, можно определить прямую, находясь на которой мобильный маяк позволит выполнить эффективное сжатие эллипса ошибок местонахождения АНПА в очередном цикле ГАНС [18].

## 4. Метод определения точности и результаты морских испытаний в составе автономного робототехнического комплекса, включающего АНПА и АНВА

Морские исследования точности одномаяковой мобильной навигационной системы АНПА были выполнены в 2013–2014 годах в заливе Петра Великого Японского моря. Для оценки точности разработанной навигационной системы был использован робототехнический комплекс МАРК, включающий АНПА и АНВА. В процессе экспериментов организовывалось движение АНПА на глубине до 15 метров. На рис. 6 показан один из эпизодов испытаний.

Скорость распространения звукового сигнала в воде оценивалась на основе показаний датчика давления, температуры и солености Citadel CTD (Teledyne RD Instruments, CША), установленного на борту АНПА. На рис. 7 показан график изменения скорости звука в зависимости от глубины погружения АНПА в процессе выполнения одного из экспериментов.

Местоположение АНВА определялось с помощью спутниковой навигационной системы высокой точности DGPS на базе приемников Trimble SPS 855 GNSS, входящих в базовую и мобильную (роверную) станции, работающие



в режиме RTK. Среднеквадратическая погрешность определения координат (3σ) для данной системы составляет около 6 см.

Для описания местоположения АНПА и АНВА в рамках проведенных натурных экспериментов использовалась единая для обоих аппаратов локальная неподвижная прямоугольная система координат, начало которой располагалось в точке с географическими координатами 43° 01' 07,43" северной широты, 131° 52' 16,40" восточной долготы, а оси Х, У и Z направлены на север, восток и вертикально вниз соответственно.

В рамках проведенных испытаний был выполнен ряд экспериментов, связанных с решением следующих задач:

местопо-

маяком и DGPS

АНПА

• оценка точности определения дальности на основе измерения времени распространения гидроакустического сигнала при помощи гидроакустических модемов EvoLogics S2C R 18/34 [20];

• исследование точности работы гидроакустической навигационной системы АНПА, основанной на использовании одного мобильного гидроакустического маяка.

Для оценки точности определения дистанции между АНПА и АНВА, транспортирующего гидроакустический маяк, использовалась следующая методика.





АНПА закреплялся в подводном положении на краю пирса в точке, координаты которой были измерены с высокой точностью с помощью указанной DGPS. Затем АНВА, оснащенный роверной частью DGPS, выполнял движение по заданной траектории. Измерялись отклонения дальностей, полученных с помощью ГАНС, от рассчитанных на основе показаний DGPS. Эксперименты показали, что ошибка определения дальностей между АНПА и АНВА на дистанциях до 1 км составляет несколько десятков сантиметров, что соответствует около 10-3 от дальности между аппаратами. На рис. 8 показаны графики изменения дистанций между АНПА и АНВА по данным ГАНС и DGPS в процессе выполнения одной из миссий.

В проведенных экспериментах учитывались следующие источники ошибок:

• разнесение по вертикали на 2,5 метра гидроакустической антенны и антенны приемника системы спутникового позиционирования на борту АНВА способно вносить несоответствие в дальности за счет качки на волнах по крену и дифференту;

• многолучевой характер распространения звукового сигнала и непостоянство скорости распространения звукового сигнала в воде вдоль всей траектории его распространения приводят к ошибкам в измерении дальности (при помощи СТД измеряется значение данного параметра лишь вблизи АНПА);

• колебания АНПА с гидроакустической антенной в подвод-HOM положении относительно заданной точки на краю пирса приводит к рассогласованию предполагаемой и фактической дальностей.

При исследовании точности работы предложенной СДБ



Рис. 8. Графики изменения дистанций между АНПА и АНВА по данным ГАНС и DGPS при выполнении одной из миссий (а – 5-секундный фрагмент, шаг сетки 0,5 м; б – 120-секундный фрагмент, шаг сетки 20 м)

ГАНС фактические точки старта (погружения) и точка финиша (всплытия) в процессе выполнения программы-задания АНПА измерялись с помощью DGPS, установленном на АНВА. Полученные координаты в локальной неподвижной системе координат сравнивались с результатами работы СДБ ГАНС. Если в момент окончания миссии в точке всплытия за основу брать координаты, полученные с помощью DGPS, то имеют место приведенные в табл. 3 ошибки определения координат АНПА для ССП, алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана и алгоритма на основе фильтра частиц.

На рис. 9 приведена траектория АНПА (в локальной неподвижной системе координат) по данным бортовой GPS при движении по поверхности (красная кривая) и на основе показаний ССП при движении под водой (синяя кривая), полученные в одном из экспериментов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты морских испытаний подтверждают работоспособность и достаточно высокую точность разработанной ГАНС, сопоставимую с ДБ ГАНС средней точности. Продемонстрирована практическая работоспособность метода оценивания точности работы СДБ ГАНС АНПА с помощью АНВА с установленной на нем мобильной частью DGPS.

Исследование выполнено при поддержке гранта ДВФУ и гранта РНФ 145000034 (экспериментальная часть исследования). Авторы

Расширенный ССП Фильтр частиц фильтр Калмана Ошибка определения координат  $\Delta X = 7,31$  m;  $\Delta X = 0.3$  m;  $\Delta X = -0.35$  m; в момент окончания миссии  $\Delta Y = 40,44 \text{ M}$  $\Delta Y = -2,19 \text{ M}$  $\Delta Y = -0.04 \text{ M}$ -50 0 BOCTOK, M 50 100 -50 0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 Север, м

Таблица 3. Ошибки определения координат АНПА

Рис. 9. Траектория АНПА в одном из запусков по данным бортового GPS при движении по поверхности (красная кривая) и по данным ССП при движении под водой (синяя кривая)

выражают свою признательность всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН и ДВФУ, принимавшим участие в подготовке и проведении морских испытаний с применением рассмотренного робототехнического комплекса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.

2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.

3. Matos A., Cruz N. AUV Navigation and Guidance in a Moving Acoustic Network // Proc. of OCEANS'05 MTS/IEEE. Brest, France, 2005.

4. Curcio J., Leonard J., Vaganay J., Patrikalakis A., Bahr A., Battle D., Schmidt H., Grund M. Experiments in Moving Baseline Navigation using Autonomous Surface Craft // Proc. of OCEANS'05 MTS/ IEEE. Washington, USA, 2005.

5. Twiggs B., Kitts C., Ballou P. Self-Positioning Smart Buoys, The "Un-Buoy" Solution: Logistic Considerations using Autonomous Surface Craft Technology and Improved Communications Infrastructure // Proc. of OCEANS'06 MTS/IEEE. Boston, USA, 2006.

6. Santos N., Matos A., Cruz N. Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle in a Mobile Network // Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE. Quebec, Canada, 2008.

7. 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 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy, 2007.

8. Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L. Synchronous-Clock One-Way-Travel-

Time Acoustic Navigation for Underwater Vehicles // Jorn. of Field Robotics: Special Issue on State of the Art in Maritime Autonomous Surface and Underwater Vehicles. 2011. Vol. 28, N 1. P. 121–136.

9. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // XIV Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: материалы докл. СПб., 2007. С. 251-256.

10. Hageh O.K. et al. Underwater Transponder Positioning and Navigation of Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of OCEANS'09 MTS/IEEE. Biloxi, USA, 2009.

11. Kalwa J., Carreiro-Silva M., Tempera F., Fontes J., Santos R.S., Fabri M-C, Brignone L., Ridao P., Birk A., Glotzbach T., Caccia M., Alves J., Pascoal A.. The MORPH Concept and Its Application in Marine Research. // Proc. of OCEANS'13 MTS/IEEE. Bergen, Norway, 2013.

12. Webster S.E., Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L. Preliminary Deep Water

Results in Single Beacon One Way Travel Time Acoustic Navigation for Underwater Vehicles // Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). St. Louis, USA, 2009.

13. Webster S.E., Whitcomb L.L., Eustice R.M. Advances in Decentralized Single-Beacon Acoustic Navigation for Underwater Vehicles: Theory and Simulation // Proc. of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Conference. Monterey, USA, 2010.

14. Ferreira B., Matos A., Cruz N. Single Beacon Navigation: Localization and Control of the MARES AUV // Proc. of OCEANS'10 MTS/IEEE. Seattle, USA, 2010.

15. Jouffroy J., Reger J. An Algebraic Perspective to Single-Transponder Underwater Navigation // Proc. of IEEE 2006 Conference. Munich, Germany, 2006.

16. Morice C., Veres S. Geometric Bounding Techniques for Underwater Localisation using Range-Only Sensors // Systems and Control. 2010.

17. Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of AUV MMT3000 Positioning Based on Use

of Towed Acoustic Transducer // Proc. of the 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07). Durham, USA, 2007.

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

19. Кушнерик А.А., Михайлов Д.Н., Сергеенко Н.С. и др. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 67–72.

20. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Bannasch R. и др. Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа масштаба кубического километра на озере Байкал // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 87–97.

