

Ф. С. ДУБРОВИН, А. Ф. ЩЕРБАТЮК

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ
ОДНОМАЯКОВОЙ МОБИЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АНПА:
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МОРСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

Данная статья посвящена вопросу навигации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с помощью одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого автономным необитаемым водным аппаратом (АНВА), движущимся по поверхности. Исследованы два алгоритма оценивания местоположения АНПА, использующие информацию о дальности до маяка и данные бортовой автономной навигационной системы. Первый алгоритм основан на применении расширенного фильтра Калмана, а второй использует фильтр частиц. Приведены данные моделирования работы рассмотренных алгоритмов и некоторые результаты морских испытаний с использованием морского робототехнического комплекса МАРК, содержащего АНПА и АНВА.

Ключевые слова: одномаяковая мобильная навигация, автономный необитаемый подводный аппарат, автономный необитаемый водный аппарат, моделирование, морские испытания.

Введение

При разработке современных АНПА одной из основных целей является обеспечение высокой мобильности и экономической эффективности подводного робототехнического комплекса в целом, включая организацию навигационного обеспечения. Основу навигационной системы АНПА обычно составляет система счисления пути, в состав которой входят доплеровский лаг (ДЛ), датчики угловой ориентации АНПА и датчик глубины. Данные спутниковой навигационной системы (СНС) используются обычно только для определения местоположения АНПА во время нахождения на поверхности моря перед началом выполнения миссии и после ее окончания.

Недостатком системы счисления пути (ССП) является постепенное накопление погрешностей, входящих в измерения навигационных датчиков. Погрешности в определении местоположения могут составлять от нескольких десятков до сотен метров за час работы, в зависимости от точности используемых датчиков, поэтому ССП неспособна самостоятельно обеспечить приемлемую точность навигации АНПА при выполнении достаточно продолжительных миссий,

Дубровин Федор Сергеевич. Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории необитаемых подводных аппаратов и их систем Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток).

Щербатюк Александр Федорович. Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, заведующий лабораторией навигации и обработки сенсорной информации Института проблем морских технологий ДВО РАН (г. Владивосток), заведующий лабораторией необитаемых подводных аппаратов и их систем Дальневосточного федерального университета.

Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015.

которые могут составлять от нескольких десятков часов до нескольких суток. Кроме того, для обеспечения возможности измерения абсолютной скорости движения с помощью ДЛ АНПА необходимо находиться вблизи дна на высоте в несколько десятков метров. В глубоководных миссиях имеет место достаточно продолжительный процесс заглубления АНПА, прежде чем будет достигнута требуемая для работы ДЛ высота над дном. За это время горизонтальный снос АНПА, обусловленный течениями, может составить несколько сот метров. В связи с этим необходимо уточнение положения АНПА перед выполнением основной миссии.

Для обеспечения требуемой точности навигации АНПА, которая может составлять от 1 до 10 м, в процессе выполнения миссии необходимо периодически осуществлять коррекцию счислимых координат. Всплытие АНПА на поверхность для уточнения положения по СНС является слишком затратным во временном и энергетическом плане. Для уменьшения накапливающейся со временем погрешности счисления наиболее широкое распространение получили гидроакустические навигационные системы с длинной базой (ДБ ГАНС) [1, 2].

В системе ДБ ГАНС имеется несколько придонных маяков-ответчиков (МО), оборудованных приемо-передающими устройствами. АНПА имеет на борту излучатель гидроакустического сигнала, приемник, регистрирующий отклики от МО, и вычислитель, предназначенный для обработки поступающей информации и управления работой излучателя и приемника. Измеряемой величиной в данной системе является время распространения гидроакустического сигнала до МО и обратно. По дальностям до МО, положение которых определено заранее, вычисляется положение АНПА. Для однозначного одномоментного определения координат АНПА необходимо иметь информацию минимум от трех МО.

В зависимости от размера зоны, в которой работает объект, период работы ДБ ГАНС может лежать в интервале от нескольких секунд до нескольких минут. Погрешность определения положения движущегося объекта в данном случае зависит от точности определения координат МО, знания эффективной скорости звукового сигнала в воде (для перевода временных задержек распространения сигнала в дальности) и точности фиксации моментов прихода откликов от МО. Процедуру определения местоположения объекта существенно усложняют явление многолучевости и ложные срабатывания приемника ГАНС на шумы и импульсные помехи. Также возможны ситуации пропадания откликов из-за наличия препятствий между объектом и МО. Погрешность определения дальности между МО и подводным объектом может составлять от менее 0,01% от измеряемой дальности для прецизионных до 0,1% для низкоточных ДБ ГАНС.

ГАНС с длинной базой предполагают развертывание и калибровку сети придонных маяков 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.

Одним из способов повышения мобильности навигационного комплекса является использование сети гидроакустических маяков, движущихся по поверхности моря и определяющих свое местоположение с помощью СНС [3–6]. Другим, более экономичным способом создания мобильного навигационного ком-

плекса для АНПА является разработка ГАНС с синтезированной длинной базой. Основная идея его состоит в использовании единственного мобильного навигационного маяка, буксируемого обеспечивающим судном или автономным необитаемым водным аппаратом.

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) [11–13], однако его применение ограничено в случае, когда начальная погрешность 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) [12], а также алгебраический метод [14]. Геометрический подход для решения данной задачи описан в работе [15], при этом процесс локализации состоит в построении области, ограничивающей возможные положения АНПА, и выполнении некоторых операций над данной областью. В статьях [16–17] предложены и исследованы несколько алгоритмов, предназначенных для решения указанной задачи в случае произвольной начальной ошибки определения местоположения АНПА.

Данная работа посвящена вопросу обеспечения навигации автономного необитаемого подводного аппарата с помощью одного мобильного гидроакустического маяка. Предполагается, что навигационный маяк представляет собой автономный необитаемый водный аппарат с зафиксированной на нем гидроакустической антенной. Для определения с требуемой точностью текущего местоположения мобильного маяка транспортирующий его АНВА оборудован комбинированным приемником спутниковой навигационной системы (GPS и ГЛОНАСС). Данный подход основан на использовании модемной гидроакустической связи, которая позволяет АНПА и АНВА обмениваться пакетами данных, а также определять дальность между аппаратами на основе измеряемого времени распространения акустического сигнала [7–10].

В процессе работы с АНПА используется подход, в котором на предварительном этапе определяется начальное местоположение АНПА и оценивается эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде [18]. Исследованы два алгоритма коррекции местоположения АНПА на основе информации о дальности до мобильного гидроакустического маяка. Первый алгоритм основан на применении для оценивания местоположения АНПА расширенного фильтра Калмана, а второй алгоритм заключается в использовании фильтра частиц. С помощью моделирующей системы выполнено исследование работы предложенных алгоритмов коррекции на примере миссии, включающей длинные прямолинейные галсы. Представлены результаты, позволяющие сравнить точность исследуемых алгоритмов коррекции местоположения АНПА. Приведены некоторые результаты работы предложенных алгоритмов, полученные в процессе морских испытаний в составе морского робототехнического комплекса МАРК, содержащего АНПА и АНВА.

1. Алгоритмы оценивания местоположения АНПА

Один из подходов, используемый нами для оценивания местоположения АНПА, основан на реализации расширенного фильтра Калмана. При этом координаты АНПА и степень точности их оценки описываются с помощью вектора

состояния X и его ковариационной матрицы P . Введем следующие обозначения: \hat{X}_{k-1} – полученная на предыдущем шаге оценка вектора состояния, \hat{P}_{k-1} – ковариационная матрица для оцененного вектора состояния, ΔX_k – вектор перемещения АНПА, \tilde{X}_k – прогноз вектора состояния и \tilde{P}_k – его ковариационная матрица.

Поскольку глубина погружения может быть измерена непосредственно с достаточно высокой точностью датчиком давления, в дальнейшем оцениваться будут только координаты АНПА в горизонтальной плоскости и вектор состояния X будет содержать только две компоненты.

Пусть в момент времени t_{k-1} подводным аппаратом был получен $(k-1)$ -й навигационный сигнал от гидроакустического маяка, и в результате работы алгоритма коррекции счислимых координат получена оценка местоположения АНПА в горизонтальной плоскости $\hat{X}_{k-1} = [\hat{x}_{k-1}, \hat{y}_{k-1}]^T$.

В промежутках времени между моментами получения навигационных сигналов от гидроакустического маяка ССП осуществляет счисление координат АНПА на основе данных от доплеровского лага и датчика курса. Предполагается, что углы дифферента и крена малы и ими можно пренебречь. К моменту времени t_k получения подводным аппаратом k -го навигационного сигнала перемещение АНПА $\Delta X_k = [\Delta x_k, \Delta y_k]^T$ определяется в соответствии со следующими выражениями:

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

где $v(t)$ – модуль скорости движения АНПА, $\varphi(t)$ – курс АНПА.

На этапе экстраполяции работы фильтра Калмана выполняется расчет величин \tilde{X}_k и \tilde{P}_k . Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки \hat{X}_{k-1} и \hat{P}_{k-1} , а также определенный в соответствии с (1) вектор перемещения АНПА ΔX_k и его ковариационная матрица N_k . Пересчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$\tilde{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta X_k, \quad (2)$$

$$\tilde{P}_k = \hat{P}_{k-1} + N_k. \quad (3)$$

На этапе коррекции работы дискретного фильтра Калмана имеем:

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k \left[D_k - d(\tilde{X}_k, z_k) \right], \quad (4)$$

$$\hat{P}_k = \tilde{P}_k + N_k, \quad (5)$$

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

$$d(\tilde{X}_k, z_k) = \sqrt{(\tilde{x}_k - x_{bk})^2 + (\tilde{y}_k - y_{bk})^2 + (z_k - z_{bk})^2}, \quad (6)$$

x_{bk}, y_{bk}, z_{bk} – координаты маяка в момент излучения k -го навигационного сигнала, z_k – глубина погружения АНПА в момент получения k -го навигационного сигнала, K_k – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления, рассчитываемая в соответствии с выражением

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T [H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k]^{-1}; \quad (7)$$

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

$$H_k = \left[\frac{\partial d(X, z_k)}{\partial X} \right]_{X=\tilde{X}_k} = \frac{1}{\sqrt{(\tilde{x}_k - x_{bk})^2 + (\tilde{y}_k - y_{bk})^2 + (z_k - z_{bk})^2}} [\tilde{x}_k - x_{bk} \quad \tilde{y}_k - y_{bk}]. \quad (8)$$

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 погрешностей для оценки вектора состояния позволяет контролировать сходимость и устойчивость процесса оценивания.

Другим подходом к получению оценки местоположения АНПА является использование фильтра частиц [20, 21], в рамках которого распределение вероятностей возможного местонахождения АНПА описывается с помощью набора точек $\{X_1, \dots, X_N\}$ (так называемых частиц), каждая из которых имеет вес ω_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 несколькими способами, например:

а) 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 с помощью ГАНС;

б) точки с равными весами распределяются в некотором круге, центр которого находится в точке погружения АНПА, координаты точки фиксируются с помощью приемника спутниковой навигации, а радиус круга выбирается с учетом возможного неконтролируемого дрейфа АНПА за время погружения вследствие наличия течений (этот способ был использован в работе).

2. Обновление. На основе информации от бортовой системы счисления пути осуществляется перемещение облака точек с добавлением к вектору перемещения каждой частицы случайной погрешности.

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 вес, существенно отличный от нуля: большинство частиц вырождается (их веса уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми). В связи с этим после каждого этапа коррекции определяется эффективное число частиц в соответствии с выражением

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \omega_i^2}. \quad (9)$$

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

$$\bar{\mathbf{X}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_i \omega_i. \quad (10)$$

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

$$P = \begin{pmatrix} p_x & p_{xy} \\ p_{xy} & p_y \end{pmatrix} = E[(\mathbf{X} - E\mathbf{X})(\mathbf{X} - E\mathbf{X})^T] = \sum_{i=1}^N \omega_i (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^T. \quad (11)$$

2. Система моделирования

Для исследования рассмотренных алгоритмов была разработана система моделирования, реализованная на языке C++ с использованием открытых библиотек Boost и OpenCV для математических вычислений и визуализации. Система моделирования позволяет создавать произвольное количество подводных аппаратов и маяков и одновременно тестировать несколько алгоритмов оценивания местоположения АНПА. Структурная схема системы моделирования приведена на рис. 1.

С помощью данной системы моделирования была исследована работа алгоритмов на основе расширенного фильтра Калмана и на основе фильтра частиц. Данные алгоритмы могут работать параллельно с одним и тем же набором параметров моделирующей системы, такими как параметры генерации шумов измерений, параметры движения аппаратов и т.д. Каждый алгоритм при этом использует свою систему, состоящую из подводного аппарата и маяка, начальное положение и параметры которых совпадают.

В модели присутствует блок формирования траектории движения подводных аппаратов, позволяющий формировать траекторию произвольного вида и управлять параметрами движения АНПА. Блок формирования траектории движения маяка поддерживает несколько режимов работы. В первом режиме траектория маяка задается жестко в виде определенной функции координат от времени и не зависит от внешних факторов. Во втором режиме маяк, в зависимости от результата работы алгоритма коррекции местоположения АНПА, самостоятельно выбирает целевую точку на каждом шаге работы ГАНС, формируя тем самым свою траекторию непосредственно в процессе работы. Также в системе моделирования формируются измерения параметров движения аппаратов и шумы их измерений.

3. Некоторые результаты 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 скорости движения АНПА искажались путем прибавления к программному значению шума, который представлял собой нормально распределенную случайную величину с постоянным смещением 0,01 м/с и среднеквадратическим отклонением 0,05 м/с. Погрешности измерения курса АНПА моделировались нормально распределенным случайным значением с постоянным смещением 0,1° и среднеквадратическим отклонением 0,5°. Приведенные постоянные погрешности измерения скорости и курса за 4 ч работы приводят к погрешности ССП, составляющей около 150 м.

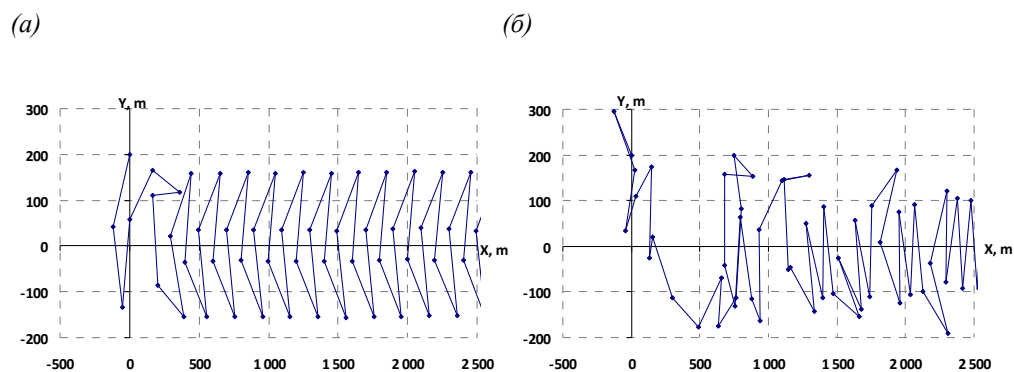


Рис. 2. Траектория движения мобильного маяка при использовании расширенного фильтра Калмана (а) и фильтра частиц (б)

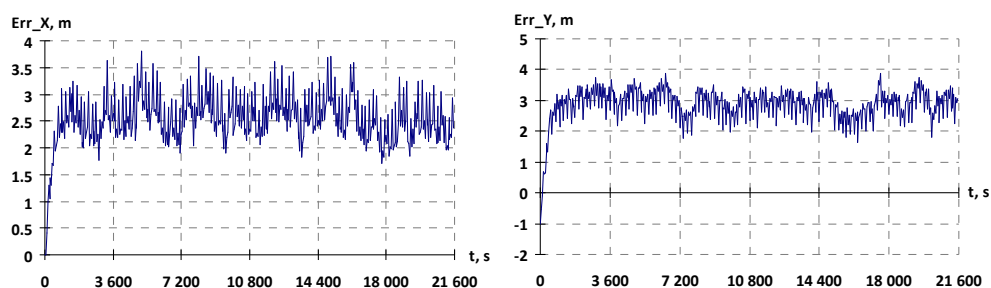


Рис. 3. Погрешность оценивания координат АНПА с использованием расширенного фильтра Калмана

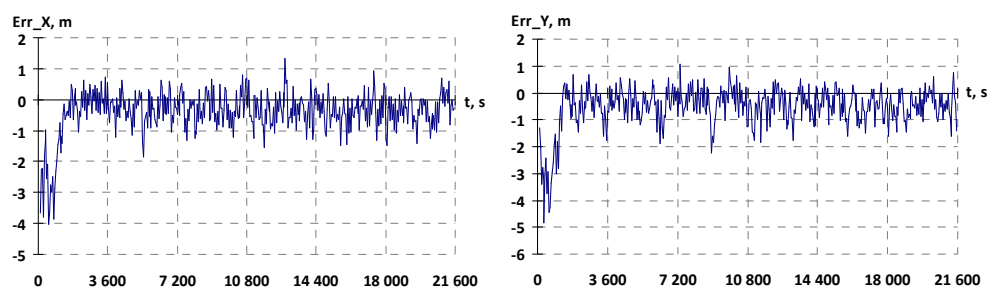


Рис. 4. Погрешность оценивания координат АНПА с использованием фильтра частиц

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что погрешность оценивания координат АНПА для обоих алгоритмов примерно одинакова и составляет несколько метров.

4. Некоторые результаты работы предложенных алгоритмов в составе автономного робототехнического комплекса, содержащего АНПА и АНВА

С 15 сентября по 26 октября 2014 г. в бухте Новик острова Русский проводились плановые испытания морского автономного робототехнического комплекса МАРК (рис. 5). Глубина в районе проведения натурных экспериментов

не превышала 15 м, и волнение моря не превышало 3 баллов. В основных экспериментах АНПА двигался на глубине от 2 до 5 м, акустическая антенна АНВА располагалась на глубине 1,5 м. Уровень акустических помех был таков, что число сбойных тактов работы гидроакустической навигационной системы не превышало 15% от общего числа.



Рис. 5. Момент маневрирования АНВА, оснащенного акустическим маяком и навигационной системой высокой точности DGPS, вблизи АНПА

На рис. 6 показан график изменения скорости звука в зависимости от глубины погружения АНПА в процессе выполнения одного из экспериментов, который был построен на основе показаний датчика солености, температуры и давления Citadel CTD (Teledyne RD Instruments, США), установленного на борту АНПА.

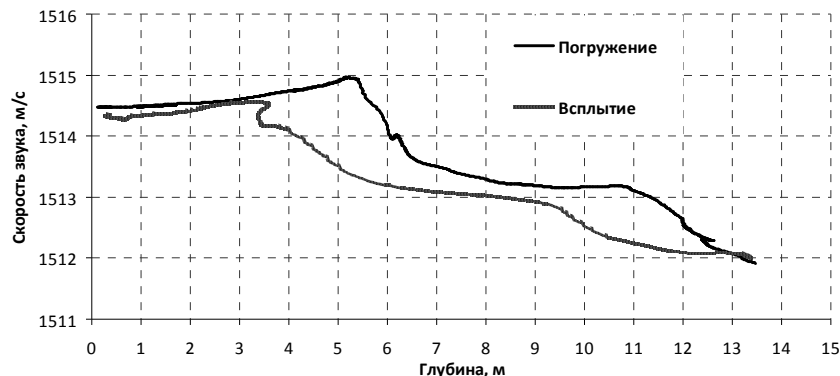


Рис 6. График изменения скорости звука в зависимости от глубины погружения АНПА в процессе выполнения одной из миссий

В рамках данных испытаний был выполнен ряд работ, связанных с решением следующих задач:

- настройка и тестирование на АНВА спутниковой навигационной системы высокой точности DGPS на базе приемника Trimble SPS 855 GNSS и GPS антенны Trimble GA810 GNSS, входящих в базовую и мобильную станции, работающие в режиме RTK;

- оценка точности определения дальности на основе измерения времени распространения гидроакустического сигнала с помощью гидроакустических модемов EvoLogics S2C R 18/34 [19];
- проведение морских экспериментов по одномаяковой навигации с использованием комплекса МАРК.

Особенностью спутниковой навигационной системы высокой точности DGPS на базе приемника Trimble SPS 855 GNSS является ее способность принимать навигационные данные от нескольких спутниковых навигационных систем, включая GPS, ГЛОНАСС и ГАЛИЛЕО.

Для оценки точности определения дистанции между АНВА, буксирующего гидроакустический маяк, и АНПА с помощью гидроакустических модемов EvoLogics S2C R 18/34 использовалась следующая методика. АНПА закреплялся в подводном положении на краю пирса в точке, координаты которой были измерены с сантиметровой точностью с помощью DGPS. Затем АНВА, оснащенный мобильной частью DGPS, совершал различные маневры, в том числе выполнял остановки в заданных точках. В итоге выяснено, что разница в определении дальности между АНПА и АНВА, полученная с помощью DGPS и акустических модемов, не превышает 10 см на дистанциях до 1 км.

Далее было выполнено исследование точности работы предложенной ГАНС с синтезированной длинной базой. При этом использовалась следующая методика. Координаты фактических точек старта (погружения) и финиша (всплытия) в процессе выполнения программы-задания АНПА определялись с помощью DGPS, установленной на АНВА. Полученные координаты сравнивались с результатами работы предложенной ГАНС с синтезированной длинной базой. В процессе выполнения морских экспериментов диапазон наклонных дальностей между АНПА и маяком не превышал 150 м.

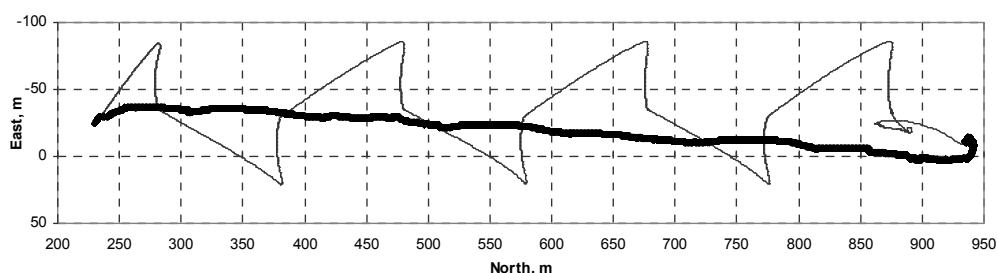


Рис. 7. Траектория АНВА по DGPS (тонкая линия) и траектория АНПА, полученная с использованием фильтра частиц (жирная линия) (пуск N 1, 20.10.2014 г.).

На рис. 7 и 8 приведены результаты одного из экспериментов, выполненного 20 октября 2014 года. Оценка координат АНПА (относительно точки старта) в момент окончания миссии:

- по данным ССП: $X = 927,26$ м; $Y = -51,70$ м,
- с коррекцией на основе ФК: $X = 934,27$ м; $Y = -9,07$ м,
- с коррекцией на основе ФЧ: $X = 934,92$ м; $Y = -11,22$ м,
- на основе данных DGPS АНВА: $X = 934,57$ м; $Y = -11,26$ м.

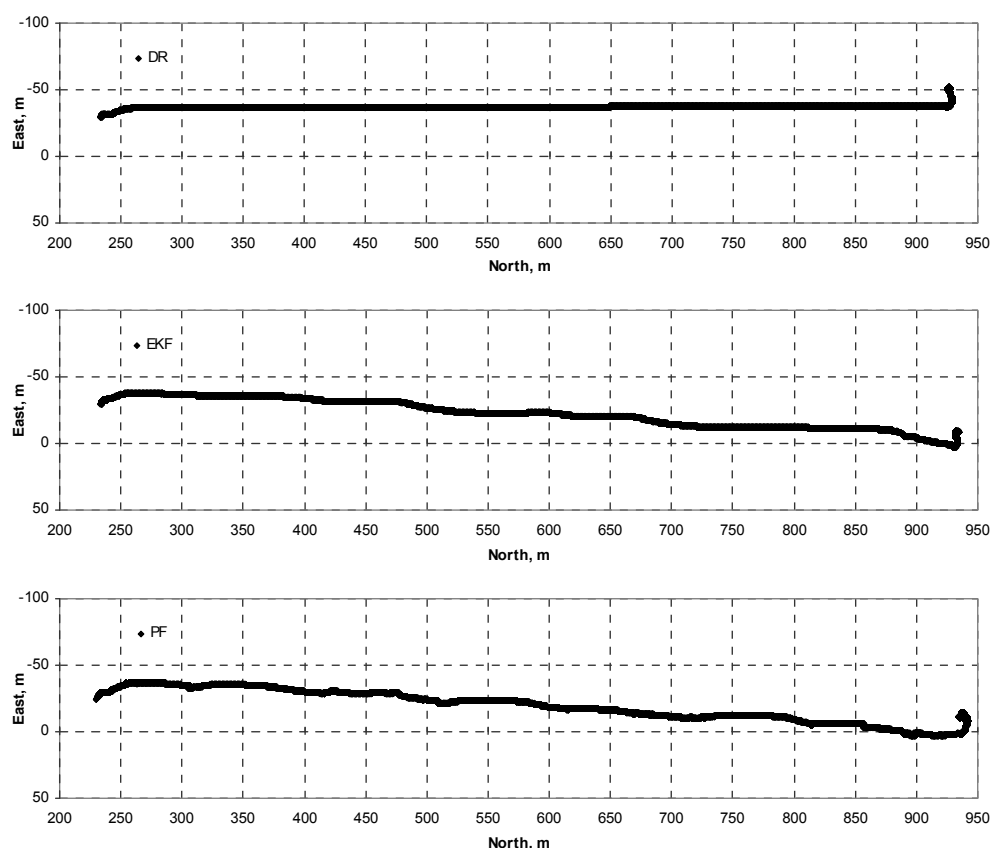


Рис. 8. Траектории АНПА, полученные на основе ССП (DR), с использованием алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана (EKF) и алгоритма на основе фильтра частиц (PF) (пуск №1, 20.10.2014)

Таким образом, если за основу брать координаты, полученные с помощью DGPS, погрешности определения координат АНПА для ССП, алгоритма на основе расширенного фильтра Калмана и алгоритма на основе фильтра частиц приведены в таблице.

Погрешности определения координат АНПА на момент окончания миссии

ССП	Расширенный фильтр Калмана	Фильтр частиц
$\Delta X = 7,31$ м; $\Delta Y = 40,44$ м	$\Delta X = 0,3$ м; $\Delta Y = -2,19$ м	$\Delta X = -0,35$ м; $\Delta Y = -0,04$ м

Заключение

Результаты морских испытаний подтверждают работоспособность и высокую точность разработанной ГАНС с синтезированной длинной базой. Сравнение работы алгоритмов комплексирования, построенных на основе расширенного фильтра Калмана и фильтра частиц, показывает более высокую точность алгоритма на основе фильтра частиц для проведенного эксперимента.

Благодарности

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 130800967, гранта РНФ 145000034 (раздел – результаты морских экспериментальных исследований) и гранта Дальневосточного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. - Л.: Судостроение, 1981. - 223 с.
2. Агеев М.Д., Золотарев В.В., Инзарцев А.В., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Щербатюк А.Ф. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. - 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 International 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 // Field Robotics, Special Issue on State of the Art in Maritime Autonomous Surface and Underwater Vehicles. 2011.
9. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 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, October 26-29. Biloxi, USA, 2009.
11. 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) 2009, St. Louis, MO, 2009.
12. Ferreira B., Matos A., Cruz N. Single Beacon Navigation: Localization and Control of the MARES AUV // Proc. of OCEANS'10 MTS/IEEE, September 20-23. Seattle, USA, 2010.
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, CA, USA, 2010.
14. Jouffroy J., Reger J. An Algebraic Perspective to Single-Transponder Underwater Navigation // Proc. of IEEE 2006 Conference. Munich, Germany, 2006.
15. Morice C., Veres S. Geometric Bounding Techniques for Underwater Localisation using Range-Only Sensors // Systems and Control. 2010.
16. Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of AUV MMT3000 Positioning Based on Use of Towed Acoustic Transducer // Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07). August 19-22, 2007. Durham, New Hampshire, USA, 2007.
17. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов однопаяковой навигации АНПА // IV Всероссийская науч.-техн. Конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана»: материалы докл. - Владивосток: Дальнаука, 2011. - С. 405-413.

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, April 10-12, 2012, FEUP, Porto, Portugal.
19. **Кебкал К. Г., Кебкал А. Г., Кебкал В. К.** Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами. // Гироскопия и навигация. – 2014. -№ 2 (85). – С. 70-85.
20. **Okuma K., Taleghani A., Freitas N.D., Little J.J., Lowe D.G.** A boosted particle filter: Multi-target detection and tracking. Proc. ECCV, pp.28-39, 2004.
21. **Arulampalam S., Maskell S., Gordon N., and Clapp T.** A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-Gaussian Bayesian tracking. IEEE Trans. Signal Processing, 50(2):174–188, February, 2002.

Dubrovin F.S. , Scherbatyuk A.F. (Far Eastern Federal University, Vladivostok)

Study of the algorithms for the single beacon mobile navigation of unmanned underwater vehicles: results of simulation and sea trials // Гироскопия и Навигация. 2015. № 4(91). P. 160-172.

Abstract. This paper is devoted to the navigation of an autonomous underwater vehicle (AUV) with a mobile hydroacoustic beacon, which is transported by an autonomous surface vehicle (ASV). Two algorithms for AUV position using information on the distance to a single mobile acoustical beacon and data from the onboard reckoning system were used. The first algorithm is based on the extended Kalman filter and the second one uses the particle filter. The simulation and the marine trial results of the considered algorithms operation using AUV and ASV are discussed.

Keywords: autonomous surface and underwater vehicles, single beacon navigation, mobile hydroacoustic beacon