

УДК 527.62
EDN NZGTAD

А. Ф. ЩЕРБАТЮК

ОБ ЭКОНОМИЧНОМ СПОСОБЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИИ НЕДОРОГИХ АНПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С КОРОТКОЙ БАЗОЙ

В статье предложен экономичный способ навигационного обеспечения группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), на борту которых отсутствуют дорогостоящие системы точного времени и датчики абсолютной скорости. Подход базируется на применении гидроакустической навигационной системы (ГАНС) с короткой базой (КБ). Разработан метод позиционирования АНПА, предусматривающий оценку координат подводных аппаратов на основе модели их движения. Рассматривается вариант ГАНС с КБ, в котором блок обработки принятых сигналов для формирования измерений временных задержек на АНПА дополняется функцией измерения частоты принятого сигнала. Для него построен алгоритм оценивания местоположения на основе фильтра частиц, предназначенный для работы на борту каждого АНПА в режиме реального времени. Приведены описания предложенных алгоритмов и результаты компьютерного моделирования их работы.

Ключевые слова: гидроакустическая навигационная система с короткой базой, групповая навигация, автономный необитаемый подводный аппарат.

1. Введение

Применение групп АНПА открывает возможности для решения новых задач, а также позволяет повысить эффективность выполнения уже привычных миссий по сравнению с теми, где задействуется одиночный аппарат. Одна из важнейших задач, определяющих успешность и качество выполнения подводных миссий, – обеспечить требуемую точность навигации каждого АНПА из состава группы. В настоящее время по большей части необходимо знать координаты АНПА с точностью не хуже 10 м, а в отдельных случаях погрешность должна быть субметровой, притом что продолжительность работы подводного аппарата может составлять несколько десятков часов.

В навигационную систему АНПА обычно входит бортовая система счисления пути (ССП), включающая датчики скорости, курса и глубины, показания которых содержат погрешности. Текущее положение АНПА находится путем вычисления компонент скорости с последующим их интегрированием, что связано с накоплением погрешности в определении координат АНПА, которая для СПП средней точности может составлять более 100 м за час работы. Для коррекции СПП широко применяются гидроакустические навигационные системы с длинной, короткой и ультракороткой базами (ДБ, КБ и УКБ).

Щербатюк Александр Федорович. Член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Владивосток). ORCID 0000-0002-7600-6711.

Асинхронная ГАНС ДБ позволяет обеспечить наибольшую точность позиционирования подводного аппарата, которая в зависимости от сложности системы может составлять от 1 до 10 м на дистанциях до 10 км. Однако в случае с группой АНПА возникает следующая проблема: каждому аппарату в составе группы необходимо периодически определять свое местоположение путем опроса сети маяков, что достигается временным разделением доступа к ним. Общий период обсервации такой системы навигации зависит от количества АНПА в группе. При их большом числе каждому аппарату будет редко предоставляться временное окно для взаимодействия с маяками, что приведет к снижению точности навигации в целом. Сложности возникают и в случае добавления нового АНПА либо исключения аппарата из состава группы, так как это влечет за собой изменение временной схемы функционирования такой системы. В работе [1] предложен вариант ГАНС ДБ, работающей в разностно-дальномерном режиме, который обеспечивает одновременное определение местоположения АНПА в группе, но требует использования минимум трех гидроакустических маяков. Важно отметить, что ГАНС ДБ, а также их развертывание и обслуживание имеют значительно более высокую стоимость, чем ГАНС УКБ и КБ.

При использовании ГАНС УКБ наибольший вклад в погрешность позиционирования каждого АНПА из группы вносят погрешности определения пеленгов на маяк, для высокоточных и дорогостоящих ГАНС УКБ составляющие нередко $0,2^\circ$. При рабочей дальности до маяка 3 км это приводит к погрешности определения положения АНПА более 10 м. В ГАНС УКБ средней точности погрешность определения пеленга может достигать 2° , что при аналогичном расстоянии до маяка дает погрешность более 100 м.

В настоящей статье предложен один из наиболее экономичных способов одновременного определения координат недорогих АНПА в составе группы, основанный на использовании ГАНС КБ. Рассмотрен вариант ее исполнения, содержащий отдельный маяк, периодически излучающий акустический сигнал, и несколько приемных антенн на борту каждого АНПА. Статья обобщает результаты проведенных ранее исследований [2–3].

Статья имеет следующую структуру. В разделе 2 рассмотрены способы повышения точности ГАНС КБ для локализации подводных объектов. Постановка задачи приведена в разделе 3, функциональный состав навигационной системы АНПА с ГАНС КБ описан в разделе 4. Алгоритм одновременного определения местоположения и скорости всех АНПА на основе модели их движения и использования информации от ГАНС КБ проанализирован в разделе 5. В разделе 6 представлен вариант ГАНС КБ, в котором блок обработки принятых сигналов на АНПА дополняется функцией измерения частоты принятого сигнала. Для него построен алгоритм оценивания местоположения каждого АНПА в режиме реального времени на основе фильтра частиц. Результаты компьютерного моделирования работы предложенных алгоритмов приведены в разделе 7.

2. Способы повышения точности локализации подводных объектов с помощью ГАНС КБ

Рассмотрим вариант ГАНС КБ с двумя приемными антеннами, расположенными вдоль корпуса АНПА и фиксирующими моменты (t_1 , t_2) приема сигналов от маяка

в каждом такте его работы. Интервал времени $\Delta t_{12} = t_1 - t_2$ пропорционален разности расстояний между приемными антеннами и маяком, которая связана с пеленгом θ на маяк и базой между приемными антеннами ГАНС КБ на АНПА соотношением

$$\Delta t_{12} = (a \cdot \cos\theta)/c, \quad (1)$$

где c – скорость распространения звукового сигнала в воде; θ – угол между линией, направленной вдоль корпуса АНПА, и линией, направленной на маяк [4].

Величина базы a , расположенной вдоль корпуса АНПА, ограничена размерами его корпуса и не превышает 3-5 м. Положим, что a измерена с высокой точностью, тогда погрешность определения пеленга рассчитывается по формуле

$$\delta\theta = -(\delta c \cdot \Delta t_{12} + c \cdot \delta\Delta t_{12})/(a \cdot \sin\theta), \quad (2)$$

полученной дифференцированием уравнения (1). Отсюда следует, что погрешность определения пеленга уменьшается с увеличением базы a между приемниками, а также зависит от значения пеленга θ . Кроме того, при углах близких к $-\pi$, 0 и π , когда расстояния от маяка до антенн примерно равны, значительный вклад в конечный результат вносят небольшие шумы в измерениях.

В соответствии с (2) увеличение базы a приводит к уменьшению погрешности определения пеленга. Для виртуального увеличения базы можно использовать прием пассивного синтезирования акустической апертуры, который состоит в следующем. Допустим, что подводный аппарат на некотором участке траектории движется прямолинейно с постоянной скоростью. В этом случае за счет движения АНПА в течение нескольких тактов работы ГАНС КБ возможно формирование виртуальной антенной решетки. При этом виртуальные гидрофоны формируются с помощью фазовой коррекции. Этот прием называется методом расширенной буксируемой антенной решетки (Extended Towed Array Method – ETAM).

Значительная доля исследований в области пассивного синтезирования акустической апертуры посвящена задаче локализации объектов по их собственным шумам [5–8]. В частности, в [5] было экспериментально изучено использование ETAM для обработки непрерывных псевдослучайных сигналов и широкополосного корабельного шума. В [6] рассматриваются ограничения метода формирования пассивной синтезированной апертуры, предусматривающего перекрытие элементов антенной решетки в последовательных положениях для оценки коэффициентов фазовой коррекции, которые компенсируют перемещение антенной решетки с течением времени. Путем минимизации дисперсии оценок набора фазовых поправочных коэффициентов получено соотношение для оптимального перекрытия, на основе которого определяются границы полезного пространственного отклика в зависимости от отношения «сигнал–шум» и количества гидрофонов в антенной решетке.

В статье [7] показано, что коэффициенты фазовой коррекции могут быть оценены без ограничений на положения перекрывающихся гидрофонов. Это означает, что предлагаемый метод позволяет использовать больше измерений для расширения буксируемой антенной решетки и, как показали результаты моделирования, получить более точную оценку, чем ETAM. Кроме того, было изучено влияние на предлагаемый метод когерентности и других систематических погрешностей.

В [8] описан усовершенствованный метод оценки коэффициентов коррекции фазы на основе оригинального алгоритма ЕТАМ, предполагающий использование среднего значения нормализованных взаимных корреляций вместо среднего значения их фаз. Результаты моделирования и эксперимента показывают: в отличие от исходного модифицированный алгоритм устраняет неблагоприятное влияние точек разрыва в фазах и обеспечивает точность оценки коэффициентов коррекции фазы, что заметно повышает стабильность метода пассивной синтезированной апертуры. Даже при наличии случайного источника улучшенный алгоритм успешно синтезирует апертуру и обеспечивает более высокое разрешение и выходное отношение «сигнал–шум» (signal to noise ratio – SNR), чем при обычном формировании луча с физической антенной решеткой.

Хотя было доказано, что ЕТАМ эффективен, у него есть два ограничения. Во-первых, поскольку поправки основаны непосредственно на измерениях гидрофона, они не работают при низком SNR. Во-вторых, даже при благоприятном SNR максимальная достижимая апертура ограничена тем, что погрешность коэффициентов фазовой коррекции растет с увеличением числа виртуальных элементов антенной решетки.

Существует и другой подход к повышению точности пеленгации при локализации подводных объектов. В [9] описан метод, предусматривающий прямую оценку пеленга. По сравнению с ЕТАМ он позволяет использовать более широкую модель движения носителя антенны и, следовательно, не ограничивается только оценкой пеленга. Кроме того, в отличие от ЕТАМ, алгоритм эффективен и при низком уровне SNR, что продемонстрировали результаты морских испытаний в проливе Нантакет. В эксперименте участвовали пришвартованное у причала судно и подводный аппарат, буксирующий антенную решетку по прямой радиальной траектории от источника звука. В статье также приведены результаты успешной обработки данных для отслеживания паромы, который излучал широкополосный звук.

3. Постановка задачи обеспечения навигации АНПА с использованием ГАНС КБ

Рассмотрим оценивание местоположения произвольного АНПА из группы в неподвижной системе координат, связанной с наземным пунктом управления, в которой оси Ox , Oy и Oz направлены соответственно на север, восток и вертикально вниз. Положим, что вертикальная координата (глубина) z и скорость распространения гидроакустического сигнала с измеряются на борту АНПА с требуемой точностью. Для простоты изложения будем считать, что АНПА движется в горизонтальной плоскости прямолинейно и равномерно. В общем случае можно полагать, что маяк находится в фиксированной точке с координатами (x_a, y_a, z_a) . Примем, что число дорогостоящих систем на каждом АНПА минимизировано и на них отсутствуют система точного времени и датчик абсолютной скорости. Ввиду этого часы АНПА и маяка рассинхронизированы и невозможно с необходимой точностью измерить время распространения акустического сигнала от маяка до антенн аппарата.

Задача заключается в одновременном навигационном обеспечении с требуемой точностью каждого АНПА из группы. Для ее решения предлагается оценить параметры движения каждого АНПА на основе модели его движения и с учетом информации от ГАНС КБ. Поставленная задача инверсна по отношению к задаче

локализации АНПА, оснащенного маяком, когда антенная система размещена на обеспечивающем судне, с борта которого выполняется отслеживание АНПА. Предполагается, что на борту каждого АНПА имеются две приемные антенны, расположенные вдоль его корпуса, и ими фиксируются моменты приема сигналов от маяка в каждом такте его работы. При этом используется отдельный маяк ГАНС КБ, местоположение которого известно, а координаты отдельных АНПА, носителей приемных антенн ГАНС КБ, определяются на их борту.

В данном случае рассмотрим решение задачи оценивания траектории движения на примере любого отдельного АНПА, представленного в виде материальной точки. Оцениваемый вектор состояния каждого АНПА включает координаты и постоянную скорость (x, y, v) . Положим, что в начальный момент времени местоположение АНПА равновероятно находится в любой точке квадратной области со стороной d_{xy} , а скорость равновероятно имеет любое значение в интервале $(0, v_{\max})$. Следуя принципу распределения информации [10, 11] и используя измерение курса $\tilde{K}$ в качестве входного сигнала в уравнениях для истинных координат отдельного подводного аппарата на k -м такте работы, запишем уравнения для вектора состояния:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \tau \cdot v_k \cdot \cos(\tilde{K}_k) + \xi_x, \\ y_k = y_{k-1} + \tau \cdot v_k \cdot \sin(\tilde{K}_k) + \xi_y, \\ v_k = v_{k-1}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{K}_k = K + K_{\xi k}$; K – истинные значения курса; $K_{\xi k}$ – центрированные погрешности в виде белого шума; ξ_x, ξ_y – погрешности из-за неточных показаний датчика курса. При малых $K_{\xi k}$ с учетом

$$\begin{aligned} \cos(K) &\approx \cos(\tilde{K}_k) + \sin(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}, \\ \sin(K) &\approx \sin(\tilde{K}_k) - \cos(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k} \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} \xi_x &\approx \tau \cdot v_k \cdot \sin(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}, \\ \xi_y &\approx -\tau \cdot v_k \cdot \cos(\tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}. \end{aligned}$$

Следует отметить: погрешности ξ_x, ξ_y носят мультипликативный характер, поскольку зависят от постоянной неизвестной скорости, которая входит в оцениваемый вектор состояния. Задача состоит в получении оценок вектора состояния АНПА при условии, что измерения $\Delta \tilde{t}_k$ разности времени распространения сигнала на две приемные антенны ГАНС КБ на АНПА содержат погрешности, которые предполагаются случайными и независимыми:

$$\Delta \tilde{t}_k = \Delta t_k + \xi_t, \quad (4)$$

$$\Delta t_k = h(x_k, y_k, K) = (D_{a2k} - D_{a1k}) / c, \quad (5)$$

где

$$D_{a2k} = (x_a - x_{a2k})^2 + (y_a - y_{a2k})^2 + (z_a - z)^2)^{0.5},$$

$$D_{a1k} = (x_a - x_{a1k})^2 + (y_a - y_{a1k})^2 + (z_a - z)^2)^{0.5},$$

$$\begin{aligned}x_{a2k} &= x_k + a \frac{\cos(K)}{2}, \quad y_{a2k} = y_k + a \frac{\sin(K)}{2}, \\x_{a1k} &= x_k - a \frac{\cos(K)}{2}, \quad y_{a1k} = y_k - a \frac{\sin(K)}{2},\end{aligned}$$

x_k, y_k – истинные координаты АНПА; a – расстояние между антеннами; x_{a1k}, y_{a1k} и x_{a2k}, y_{a2k} – истинные координаты первой и второй антенн АНПА; Δt_k – истинное значение разности времени распространения сигнала на две приемные антенны ГАНС КБ на АНПА; ξ_t – центрированная погрешность в виде белого шума с заданным значением стандартного отклонения σ_t .

Уравнение (5) показывает, как истинное Δt_k зависит от истинных курса и координат АНПА. Выразим $\Delta \tilde{t}_k$ через измеренное значение курса $\tilde{K}_k$. С учетом только членов первого порядка малости получим

$$\Delta \tilde{t}_k = h(x_k, y_k, \tilde{K}_k - K_{\xi k}) + \xi_t \approx h(x_k, y_k, \tilde{K}_k) + \xi_t - g(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}, \quad (6)$$

где

$$g(x_k, y_k, \tilde{K}_k) = \frac{a}{2c} \left[\frac{((x_a - \tilde{x}_{a2k}) \sin \tilde{K}_k - (y_a - \tilde{y}_{a2k}) \cos \tilde{K}_k) / \tilde{D}_{a2k} +}{+ ((x_a - \tilde{x}_{a1k}) \sin \tilde{K}_k - (y_a - \tilde{y}_{a1k}) \cos \tilde{K}_k) / \tilde{D}_{a1k}} \right];$$

$\tilde{D}_{a2k}, \tilde{D}_{a1k}, \tilde{x}_{a2k}, \tilde{y}_{a2k}, \tilde{x}_{a1k}, \tilde{y}_{a1k}$ – дальности от маяка до антенн на АНПА и координаты антенн, полученные на основе измеренных значений курса $\tilde{K}_k$. Следует отметить, что в (6) слагаемое $g(x_k, y_k, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi k}$ также приобретает мультипликативный характер из-за зависимости от оцениваемых координат АНПА.

Таким образом, оценку траектории будем рассматривать как задачу фильтрации вектора состояния (3) по измерению (4) с учетом описанных выше погрешностей ξ_t, ξ_x, ξ_y и $K_{\xi k}$. При этом априорная плотность вероятности оцениваемого вектора состояния в начальный момент времени составляет $p(x, y, v) = p(x) \cdot p(y) \cdot p(v)$, где $p(x), p(y)$ – равномерные функции плотности распределения вероятности (ФПРВ) в любой точке квадратной области со стороной d_{xy} , а для скорости $p(v)$ ФПРВ также равномерна в интервале $(0, v_{\max})$. На рис. 1 показаны последовательные положения АНПА на $(k-1)$ и k -м тактах работы ГАНС КБ.

4. Состав навигационной системы АНПА с ГАНС КБ

В состав навигационной системы (НС) однотипного АНПА из группы входит бортовая навигационно-пилотажная система и приемные антенны ГАНС КБ с устройством обработки сигналов. Оборудование ГАНС КБ предназначено для фиксации моментов прихода сигналов от маяка на приемные антенны АНПА. При этом устройство обработки сигналов формирует данные о временных задержках распространения звукового сигнала от маяка до антенн АНПА. Бортовая навигационно-пилотажная система включает датчики углового положения (датчики курса, крена и дифферента) подводного аппарата. На основе их показаний рассчитывается ориентация АНПА в пространстве. Вертикальная координата подводного аппарата измеряется с требуемой точностью с использованием данных от бортового датчика давления.

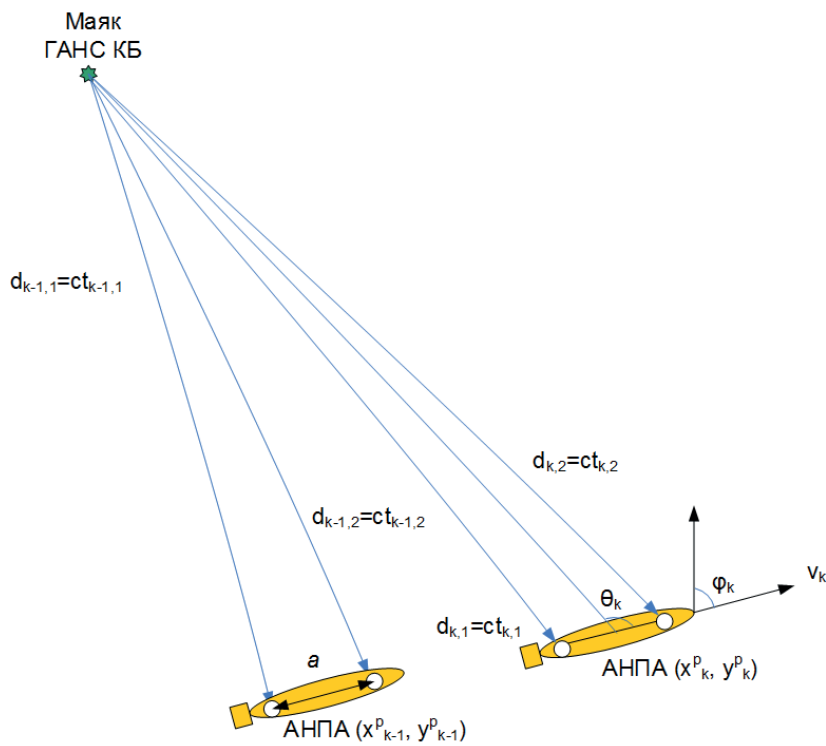


Рис. 1. Последовательные положения АНПА на $k-1$ -м и k -м тактах работы ГАНС КБ

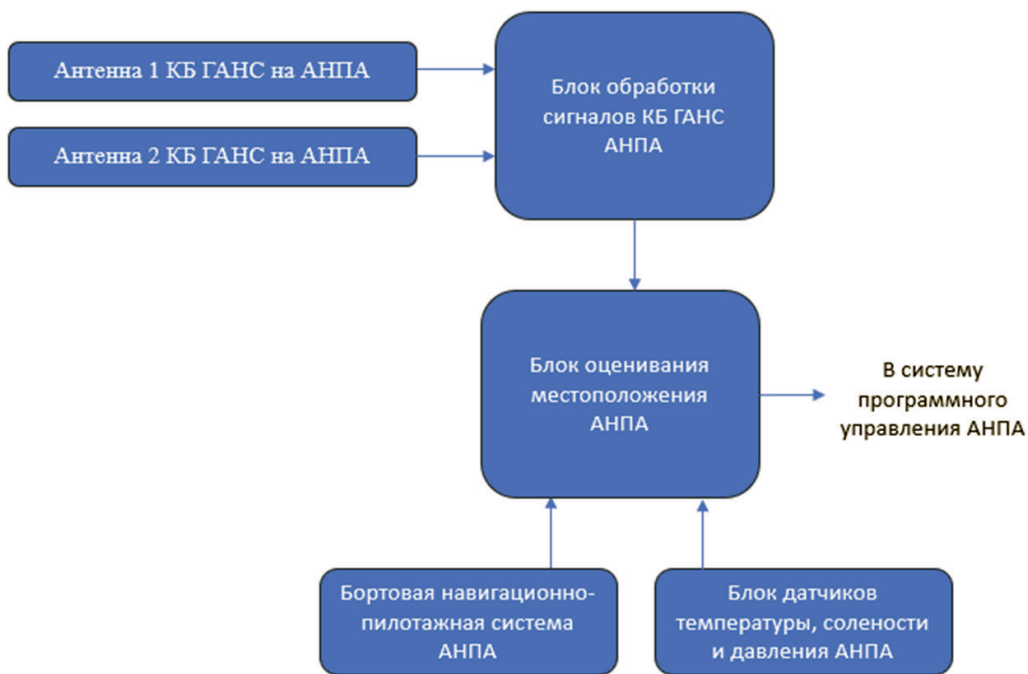


Рис. 2. Функциональная блок-схема навигационной системы АНПА с ГАНС КБ

Данные датчиков бортовой навигационно-пилотажной системы и бортовой системы ГАНС КБ обрабатываются в блоке оценивания местоположения АНПА. Кроме того, используются показания датчиков температуры, солености и давления для расчета скорости распространения звукового сигнала в воде. Алгоритмы оценивания координат подводного аппарата, функционирующие в рамках данного блока, рассмотрены в разделах 5 и 6. Полученные оценки текущего местоположения АНПА передаются в систему программного управления. На их основе выполняется коррекция параметров движения АНПА с целью перемещения его вдоль заданной программной траектории. Функциональная блок-схема НС подводного аппарата показана на рис. 2.

5. Описание алгоритма оценивания координат АНПА с помощью ГАНС КБ

Для построения навигационных алгоритмов широко применяются различные варианты фильтра Калмана: например, при использовании обобщенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filtering – EKF) выполняется линеаризация задачи путем разложения нелинейной функции в уравнениях измерений в ряд, что решает проблему фильтрации в системах с незначительной нелинейностью. При этом точность фильтрации существенно снижается в случае, когда нелинейность высока. Ансцентный фильтр Калмана (Unscented Kalman Filter) предназначен для решения с меньшей погрешностью задачи оценивания в нелинейной системе. Тем не менее в ситуации, когда система нелинейна и шумы негауссовские, что приводит в том числе к многоэкстремальности апостериорной плотности, процесс оценивания может стать неустойчивым и расходиться. Для определения местоположения мобильных объектов в данных условиях широко применяются варианты фильтра частиц (ФЧ). В настоящей работе задействован вариант ФЧ, описанный в статье [12].

Рассмотрим использование ФЧ для решения указанной в разделе 3 задачи, заключающейся в одновременном оценивании местоположения и скорости каждого АНПА из группы при наличии погрешностей в измерениях, приведенных в разделе 3. Сформируем облако из N частиц, равномерно распределенных в трехмерном пространстве (x, y, v) , где x и y – горизонтальные координаты, а v – скорость движения в горизонтальной плоскости. Нормированные веса для всех частиц в начальный момент времени принимаются одинаковыми и равными $\omega^i = 1/N$. Предположим, что АНПА движется прямолинейно и равномерно программным курсом, перемещаясь на интервале между тактами работы ГАНС КБ. Каждая частица описывает возможное состояние АНПА и его скорость в соответствии с уравнением (3).

На k -м такте работы ГАНС КБ на этапе экстраполяции ФЧ выполняется расчет предсказываемого местоположения $(\tilde{x}_k^e, \tilde{y}_k^e)$. При этом используются полученные на предыдущем шаге оценки $(\hat{x}_{k-1}^p, \hat{y}_{k-1}^p)$, а также предполагаемое перемещение АНПА:

$$\tilde{x}_k^e = \hat{x}_{k-1}^p + \tau \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \cos(\tilde{K}_k), \quad \tilde{y}_k^e = \hat{y}_{k-1}^p + \tau \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \sin(\tilde{K}_k), \quad (7)$$

где $\hat{v}_{k-1}$ – оценка скорости в $(k-1)$ -м такте, а $\tilde{K}_k$ – измерение курса движения АНПА.

На этапе коррекции ФЧ на k -м такте работы ГАНС КБ уточняются веса частиц на основе рассогласования измеренной разности $\Delta \tilde{t}_k$ времени прихода сигналов на первый и второй приемники ГАНС КБ на АНПА и разности времени прихода сигнала

лов Δt_k^i , вычисленной согласно (5) при $x_k = x_k^i, y_k = y_k^i$, для всех частиц с использованием измеренного курса $\tilde{K}$.

При этом коррекция ненормированных весов частиц выполняется с помощью функции правдоподобия, соответствующей приведенной выше модели для измерений (6):

$$\begin{aligned}\tilde{\omega}_k^i &= \left(\tilde{\omega}_{k-1}^i / \sigma_i(x_k^i, y_k^i) \right) \exp \left(- \left(\Delta \tilde{t}_k - \Delta t_k^i \right)^2 / 2 \sigma_i^2(x_k^i, y_k^i) \right), \\ \sigma_i^2(x_k^i, y_k^i) &= \sigma_1^2 + \sigma_{gi}^2(x_k^i, y_k^i),\end{aligned}\quad (8)$$

где i – номер частицы; $\tilde{\omega}_k^i$ – ненормированный вес частицы; σ_1 – стандартное отклонение для ξ_t в измерениях разностей времен прихода сигналов; $\sigma_{gi}(x_k^i, y_k^i)$ – стандартное отклонение для $g(x_k^i, y_k^i, \tilde{K}_k) \cdot K_{\xi_k}$. После вычислений согласно (8) веса всех частиц нормируются.

В процессе работы ФЧ лишь небольшое число частиц будет иметь существенные, отличные от нуля, веса. Большинство частиц вырождаются, их веса уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми. Для повышения эффективности работы ФЧ применяется процедура перевыборки частиц [13]. Она выполняется, если количество эффективных частиц N_{kef} ниже порогового значения N_{th} , которое обычно рекомендуется выбирать не менее $2/3$ от общего числа частиц N , т.е.

$$N_{kef} = 1 / \sum_{i=1}^N (\omega_k^i)^2 < N_{th}, \quad (9)$$

где ω_k^i – нормированные веса. На этапе перевыборки частицы с малыми весами не воспроизводятся, а эффективные частицы сохраняются и клонируются в соответствии с апостериорным распределением на текущем шаге; затем вокруг них формируется новый набор частиц с одинаковыми весами. При этом общее количество частиц остается неизменным [13].

Оценка местоположения $(\hat{x}_k^p, \hat{y}_k^p)$ и скорости $\hat{v}_k$ для каждого АНПА из группы на k -м шаге работы ГАНС КБ вычисляется взвешиванием значений координат и скорости для всех частиц.

6. Описание алгоритма позиционирования АНПА с использованием ГАНС КБ и измерением частоты принятого сигнала

Рассмотрим задачу оценивания координат одного АНПА из группы в предположении, что блок обработки принятых сигналов дополнен функцией измерения частоты принятого сигнала. Реализация этой функции связана с незначительной модернизацией блока, так как устройство уже оснащено основными необходимыми аппаратными модулями и требуется лишь модифицировать алгоритм обработки входного сигнала. Как и в предыдущем разделе, положим, что АНПА движется в горизонтальной плоскости прямолинейно и равномерно, маяк находится в фиксированной точке с координатами (x_a, y_a, z_a) , из-за отсутствия системы точного времени на борту АНПА его часы и часы маяка не синхронизированы, нет датчика абсолютной скорости, но известен период излучения навигационных сигналов маяком.

Для оценивания координат АНПА используются измерения $\Delta \tilde{t}_k$ времени прихода сигнала на первый и второй приемники ГАНС КБ, а также измерения частоты при-

нятого сигнала $\tilde{f}_k = f_k + \xi_f$, где f_k – истинное значение частоты принятого сигнала, ξ_f – центрированная погрешность в виде белого шума.

Согласно уравнению Доплера имеем

$$f_k = (1 + (v_k / c) \cdot \cos \theta_k) \cdot f_s, \quad (10)$$

где f_s – известная частота сигнала источника; v_k – скорость приемника; θ_k – пеленг на источник сигнала (маяк). Знак «+» в (10) выбран в предположении, что АНПА движется по направлению к маяку. В соответствии с (1) пеленг θ_k на маяк связан со значением базы a на АНПА на k -м такте соотношением

$$\theta_k = \arccos (c \cdot \Delta t_k / a). \quad (11)$$

Используя формулы (10), (11), запишем соотношение для скорости:

$$v_k = (a / \Delta t_k) ((f_k / f_s) - 1).$$

Выразим (3) через измеренные значения частоты и курса. Тогда, оставляя только члены первого порядка малости, получим:

$$x_k = x_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \cos(\tilde{K}_k) + \xi_{x1},$$

$$y_k = y_{k-1} + \tau \cdot \tilde{v}_k \cdot \sin(\tilde{K}_k) + \xi_{y1},$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{v}_k &= (a / \Delta \tilde{t}_k) \left(\left(\frac{\tilde{f}_k}{f_s} \right) - 1 \right), \\ \xi_{x1} &= \tau \left[\tilde{v}_k \sin(\tilde{K}) K_{\xi k} + (\cos(\tilde{K}) a / (f_s \Delta \tilde{t}_k)) (\xi_t (\tilde{f}_k - f_s) / \Delta \tilde{t}_k + \xi_f) \right], \\ \xi_{y1} &= \tau \left[-\tilde{v}_k \cos(\tilde{K}) K_{\xi k} + (\sin(\tilde{K}) a / (f_s \Delta \tilde{t}_k)) (\xi_t (\tilde{f}_k - f_s) / \Delta \tilde{t}_k + \xi_f) \right]. \end{aligned}$$

Следует отметить, что оцениваемый вектор состояния в отличие от предыдущего случая содержит только две координаты и погрешности ξ_{x1} , ξ_{y1} перестают быть мультипликативными и приобретают аддитивный характер.

Требуется одновременно оценить местоположение каждого АНПА из группы при условии, что измерения разности времени распространения и скорости распространения гидроакустических сигналов, а также измерения курса движения АНПА и частоты сигнала источника содержат случайные центрированные и независимые погрешности в виде белого шума.

Для решения этой задачи применяется ФЧ. Формируется облако из N частиц, равномерно распределенных в двумерном пространстве (x, y) , где x и y – горизонтальные координаты АНПА. Нормированные веса всех частиц в начальный момент времени принимаются одинаковыми. Для счисления текущих координат на борту АНПА на каждом такте работы ГАНС КБ используется рассчитанная на основе измерений частоты принятого акустического сигнала скорость его движения. На этапе экстраполяции ФЧ на текущем k -м такте выполняется расчет прогнозируемого местоположения АНПА (x_k^e, y_k^e) . Для этого применяются полученные на предыдущем $(k-1)$ -м такте оценки его координат (x_{k-1}^p, y_{k-1}^p) , а также вычисленные по формуле (6) данные о его перемещении и скорости, рассчитанной на основе измерений частоты сигнала источника.

Оценка местоположения (x_k^p, y_k^p) каждого АНПА из группы на этапе коррекции ФЧ на текущем k -м такте работы ГАНС КБ определяется аналогично тому, как это описано в части 5.

7. Результаты моделирования работы навигационных алгоритмов на основе данных ГАНС КБ

Оценка точности и работоспособности навигационного алгоритма определения местоположения АНПА выполнена в рамках численного моделирования в среде IDLE (Python), период работы ГАНС КБ составлял 10 с. Полагалось, что две приемные антенны ГАНС КБ расположены вдоль корпуса АНПА и расстояние между ними 2 м. Начальная область неопределенности местоположения АНПА представляла собой квадрат со стороной 100 м, а начальная область неопределенности скорости движения – интервал $(0; 2,0)$ м/с. Предполагалось равновероятное нахождение АНПА в любой точке указанного квадрата и равновероятное определение его скорости в любой точке указанного интервала. Скорость распространения звукового сигнала принималась равной 1500 м/с, при этом полагалось, что она рассчитывалась на АНПА с учетом показаний бортовых датчиков температуры, солености и давления с необходимой точностью.

При моделировании использовалось облако из 8000 частиц. Моделирование выполнялось методом Монте-Карло, каждый эксперимент предусматривал 100 циклов моделирования с одинаковыми заданными параметрами и разными случайными погрешностями. На основе полученных результатов рассчитывались среднее значение и дисперсия погрешностей оценивания местоположения и скорости АНПА.

На рис. 3 показана расчетная траектория движения АНПА в течение 150 тактов работы системы, которая была получена в одном из экспериментов. АНПА стартовал из точки с координатами $(-3000, -2000)$ м. Маяк был расположен в точке с координатами $(0, 0)$ м. Параметры движения АНПА в горизонтальной плоскости: скорость 1 м/с, курс 45° . Пройденный путь составил около 1500 м, время в пути – порядка 25 мин.

Во всех модельных экспериментах считалось, что измерения разницы времени прихода сигналов содержат случайные центрированные и независимые погрешности в виде шума в соответствии с моделью (6), скорость течения – нулевая, а измерения курса АНПА включают случайные центрированные и независимые погрешности в виде белого шума в диапазоне $(-0,1; 0,1)^\circ$. Результирующие погрешности оценивания координат определялись путем вычисления расстояния

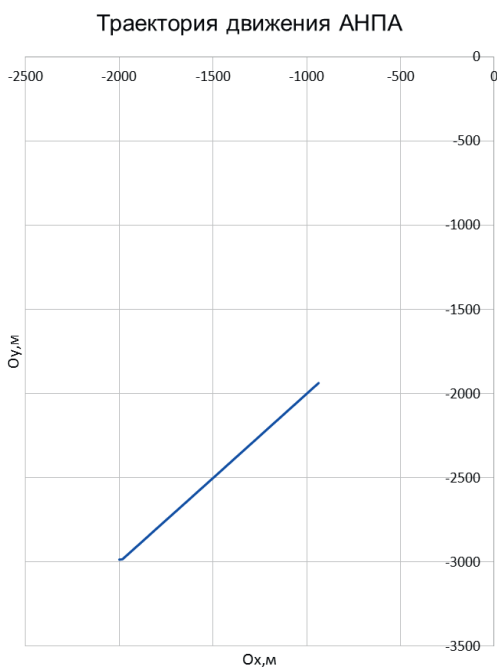


Рис. 3. Расчетная траектория движения АНПА (маяк расположен в начале координат)

в одинаковые моменты времени между положениями АНПА при безошибочных измерениях и при измерениях курса и разности времени прихода сигналов с учетом указанных в данном разделе погрешностей.

На первом этапе предполагалось отсутствие опции измерения частоты входного сигнала. В ситуации, когда случайные погрешности в измерениях разности времени прихода сигналов соответствовали ГАНС средней точности и лежали в диапазоне $(-0,3 \cdot 10^{-4}, 0,3 \cdot 10^{-4})$ с, средняя погрешность позиционирования АНПА составила 18,9 м, среднее квадратическое отклонение – 11,31 м, средняя погрешность определения скорости – 0,024 м/с, а ее среднее квадратическое отклонение – 0,013 м/с. Погрешности оценивания местоположения и скорости АНПА в процессе работы НС с использованием описанного алгоритма, полученные в ходе модельных экспериментов, показаны на рис. 4. Кривые на рисунке соответствуют случаям, когда максимальные случайные погрешности в измерениях разности времени прихода сигналов составляли $0,3 \cdot 10^{-4}$ и $0,1 \cdot 10^{-4}$ с.

Затем были выполнены модельные эксперименты в предположении, что измеряется частота входного сигнала. Для сопоставления результатов работы предложенного способа с описанным выше использовались указанные ранее параметры моделирования.

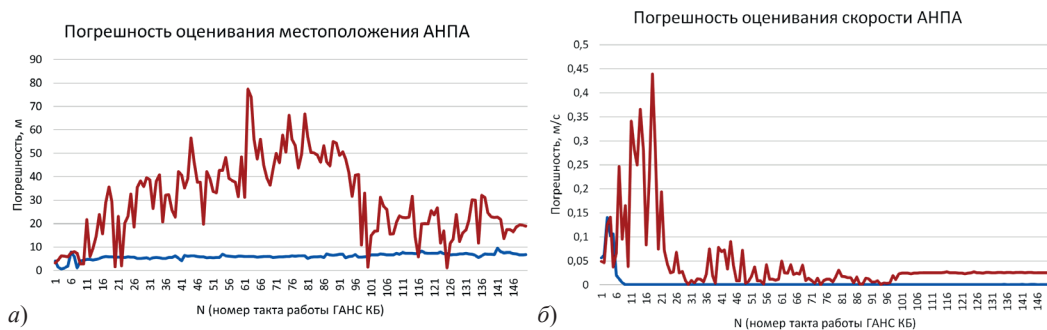


Рис. 4. Погрешности оценивания местоположения (а) и скорости движения (б) АНПА: бордовая кривая – при погрешностях в измерениях разности времени прихода сигналов в диапазоне $(-0,3 \cdot 10^{-4}, 0,3 \cdot 10^{-4})$ с, синяя кривая – $(-0,1 \cdot 10^{-4}, 0,1 \cdot 10^{-4})$ с

В ситуации, когда при моделировании случайные центрированные и независимые погрешности в виде белого шума в измерениях частоты находились в диапазоне $(-0,01 \cdot f_s, 0,01 \cdot f_s)$, а случайные погрешности в измерениях разности времени прихода сигналов – в диапазоне $(-0,3 \cdot 10^{-4}, 0,3 \cdot 10^{-4})$ с, средняя погрешность позиционирования АНПА составила 3,3 м, среднее квадратическое отклонение – 2,1 м. Полученный результат (рис. 5) свидетельствует о существенном повышении точности оценивания по сравнению с результатом, приведенным выше при аналогичных условиях моделирования без



Рис. 5. Погрешности оценивания местоположения АНПА при учете погрешностей в измерениях разности времени прихода сигналов в диапазоне $(-0,3 \cdot 10^{-4}, 0,3 \cdot 10^{-4})$ с (синяя кривая – без измерения частоты входного сигнала, бордовая кривая – с измерением частоты входного сигнала)

учета измерения частоты входного сигнала. При этом, как показывают полученные в процессе моделирования оценки, один такт работы предложенного алгоритма на борту АНПА требует более чем на порядок меньше времени, чем один такт работы алгоритма без измерения частоты входного сигнала.

Заключение

Предложен экономичный способ навигации группы недорогих АНПА с использованием ГАНС КБ, при этом на борту аппаратов отсутствуют дорогостоящие система точного времени и датчик абсолютной скорости. На основе ФЧ разработан алгоритм, обеспечивающий с требуемой точностью решение задачи оценки координат и скорости АНПА по модели их движения. Описывается вариант ГАНС с короткой базой, в котором блок обработки принятых сигналов для формирования измерений временных задержек на АНПА дополняется функцией измерения частоты принятого сигнала. Разработанный алгоритм позволил существенно снизить требования к производительности бортового компьютера АНПА и повысить точность позиционирования аппаратов по сравнению с вариантом без измерения частоты входного сигнала. Результаты моделирования предложенного алгоритма подтвердили его работоспособность и возможность с его помощью оценивать местоположение АНПА в реальном времени. Следует отметить, что при движении прямолинейным галсом в общем случае данная задача не имеет однозначного решения. Для устранения неоднозначности в процессе выполнения миссии организуется движение несколькими разными галсами [14].

В дальнейшей работе предполагается усовершенствовать предложенный подход с целью повышения точности оценивания координат АНПА из группы за счет использования измерений разностей времени прихода сигналов на приемники ГАНС КБ на АНПА на последовательных тактах работы системы.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (разработка усовершенствованного алгоритма групповой навигации АНПА на основе ГАНС КБ) и за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/> (моделирование работы алгоритма на основе фильтра частиц).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А. Разностно-дальномерная система навигации для обеспечения групповой работы морских робототехнических комплексов // Подводные исследования и робототехника. 2020. №2. С. 22–33.
2. Дубровин Ф.С., Родионов А.Ю., Щербатюк А.Ф. О повышении точности гидроакустической навигационной системы с короткой базой для обеспечения навигации группы АНПА // Материалы XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2024.
3. Щербатюк А.Ф. О способе обеспечения навигации группы АНПА с использованием КБ ГАНС // Материалы XXXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2025.
4. Бородин В., Смирнов Г., Толстякова Н. и др. Гидроакустические навигационные средства. Л.: Судостроение, 1983. 263 с.

5. Stergiopoulos, S., Urban, H., An Experimental Study in Forming a Long Synthetic Aperture at Sea, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, vol. 17, no. 1, p. 62.
6. Edelson, G., Sullivan, E., Limitations on the Overlap-Correlator Method Imposed by Noise and Signal Characteristics, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, vol. 17, no. 1, p. 30.
7. Kim, S., Youn, D., Lee, C., Temporal Domain Processing for a Synthetic Aperture Array, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, vol. 27, no. 2, p. 322.
8. Wang, Y., Gong, Z., Zhang, R., Phase correction in extended towed array method, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2017, 141, 3916.
9. Sullivan, E., Holmes J., Carey, W., Lynch, J., Broadband passive synthetic aperture: Experimental results, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, no. 4.
10. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 448 с.
11. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.
12. Gustafsson, F., Gunnarsson, F., Bergman, N. et al., Particle filters for positioning, navigation, and tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002.
13. Васильев В.А., Исаев А.М., Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы Монте-Карло в задачах обработки измерительной информации с использованием процедур перевыборки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2026. №1.
14. Scherbatyuk, A., The AUV positioning using ranges from one transponder LBL, *IEEE Proceedings of OCEANS '95 MTS*, 1995, San Diego, CA, USA, pp. 1620–1623.

Shcherbatyuk, A.F. (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok)

A Cost-Effective Method of Navigation for Inexpensive UUVs Using a Short-Baseline Acoustic Positioning System, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 4 (131), pp. 115–128.

Abstract. The paper presents a cost-effective way to solve the problem of navigation support for a group of autonomous unmanned underwater vehicles (UUV) which do not have expensive accurate time systems and absolute speed sensors. The proposed method is based on the use of an acoustic positioning system (APS) with a short baseline. A method for determining the UUV location is proposed with the coordinates of underwater vehicles being estimated according to their motion model. A short-baseline version of the APS is presented, in which the received signal processing unit for generating the time delay measurements on the UUV additionally measures the received signal frequency. A location estimation algorithm based on a particle filter has been developed for this signal processing unit; it is designed to work on each UUV in real time. The descriptions of the proposed algorithms and the results of computer simulation of their operation are presented.

Key words: short-baseline acoustic positioning system, group navigation, autonomous unmanned underwater vehicle.

Материал поступил 20.06.2025