УДК 551.46.077:629.584

РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППОВОЙ РАБОТЫ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Ю.В. Ваулин ^{1, 2}, Ф.С. Дубровин ¹, А.Ф. Щербатюк ^{1, 2}, Д.А. Щербатюк ^{1, 2} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹ Дальневосточный федеральный университет²

Навигационное обеспечение групповых операций морских робототехнических комплексов (МРК) предполагает одновременное (в рамках одного цикла работы навигационной системы) уточнение местоположения всех объектов МРК. Широко распространенная гидроакустическая навигационная система с длинной базой (ГАНС ДБ) не позволяет решить задачу, поскольку предполагает поочередную работу с объектами МРК. В работе рассмотрена задача обеспечения навигации объектов МРК при помощи разностно-дальномерной навигационной системы (РД НС). Исследованы два навигационных алгоритма, реализующих переборный и аналитический методы решения разностно-дальномерной задачи. Предложен метод применения РД НС с адаптивной конфигурацией для навигации объектов МРК в зоне акустической тени. Выполнены эксперименты, включающие компьютерное моделирование описанных алгоритмов и работу РД НС в натурных морских условиях, которые подтвердили работоспособность и необходимую точность разрабатываемой РД НС.

введение

При определении местоположения объектов МРК, которые могут включать маяки-ответчики (MO), автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и автономные необитаемые водные аппараты (АНВА), предъявляются определенные требования к их навигационным системам. Прежде всего необходимо обеспечить одновременное (в рамках одного цикла работы навигационной системы) определение координат на всех АНПА, входящих в группу. Использование распространенного способа измерения дистанций между маяками гидроакустической навигационной системы с длинной базой (ГАНС ДБ) и АНПА в режиме запрос-ответ в этом случае не позволяет решить задачу, поскольку предполагает поочередную работу с аппаратами. Решение проблемы достигается применением синхронной ГАНС, в которой встроенные часы АНПА и маяков перед работой синхронизируются. При использовании такой схемы излучение обсервационного сигнала маяками производится синхронно, в заданные моменты времени. Синхронизация работы маяков и АНПА требует наличия дорогостоящих систем точного времени. Другой подход к решению данной задачи, который не требует подобных систем, основан на работе ГАНС ДБ в разностно-дальномерном режиме.

Различные способы решения разностно-дальномерной навигационной задачи широко описаны в литературе. В статье [1] приведен обзор подходов, предназначенных для решения задач навигации групп АНПА. В работах [2–4] рассмотрены методы обеспечения навигации для группы АНПА при помощи нескольких (трех или более) стационарных гидроакустических маяков с известным местоположением. Данный подход позволяет каждому из АНПА, входящему в состав группы, не только определять свое местоположение, но и оценивать координаты других АНПА.

Один из подходов организации групповой навигации, который нашел широкое распространение при выполнении реальных морских работ, основан на использовании АНВА в качестве мобильных маяков. В работах [5–7] рассмотрены вопросы внедрения систем навигации, управления и контроля АНПА и

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел./факс: +7 (423) 243-24-16. E-mail: imtp@marine.febras.ru

² 690000, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: +7 (423) 243-44-72

АНВА в мобильных акустических сетях. Наряду с теоретическими исследованиями алгоритмов, необходимых для подобных операций, также представлены результаты моделирования и практических экспериментов, которые подтверждают работоспособность предложенных решений.

Вариант, когда для навигационного обеспечения группы АНПА используется один АНВА, рассмотрен в работах [8–11]. Приводятся результаты сравнения различных методов оценивания положения (фильтр Калмана, фильтр частиц, метод наименьших квадратов), анализируется наблюдаемость метода. С целью повышения точности навигации предлагается формировать траекторию АНВА специальным образом. Приводятся результаты модельных и натурных экспериментов.

В работе [12] коллектив авторов решает несколько задач, связанных с обеспечением групповой навигации АНПА с помощью нескольких АНВА. В статье [13] описана практическая реализация системы, в которой для навигации группы АНПА используется АНВА. Рассмотрены эксперименты, в которых навигация АНПА (Iver2) обеспечивается с помощью АНВА, который совершает круговые движения над АНПА. Статьи [14-15] посвящены вопросу навигации АНПА с помощью одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого АНВА. Вопросы формирования траектории мобильного маяка для повышения точности навигации группы АНПА рассмотрены в работах [16, 17–19]. Алгоритм планирования пути мобильного маяка, описанный в работах [17, 19] основан на методе кросс-энтропии в рамках теории марковских процессов.

В статье [20] описан подход, при котором для обеспечения навигации группы АНПА используются как измерения дальностей до мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого посредством АНВА, так и измерения дальностей между отдельными АНПА в группе. Ситуация с двумя АНПА, когда первый из них оснащен высокоточной системой навигации, а второй – навигационной системой с низкой точностью, рассмотрена в статье [21]. Для повышения точности работы второго аппарата используется информация о дальностях между аппаратами. Для оценивания местоположения второго АНПА используется алгоритм на основе фильтра Калмана.

В данной работе рассмотрены методы организации работы разностно-дальномерной ГАНС для группы АНПА на базе гидроакустических модемов Evologics и AquaTelecom [22–24]. Применение гидроакустических (ГА) модемов с опцией измерения взаимных дистанций позволяет организовать сетевую структуру ГАНС с адаптивной конфигурацией для работы АНПА в группе. Каждый подвижный или стационарный абонент подводной сети является узлом сети ГАНС. Любая передача элементарного пакета данных от абонента является для других абонентов частью цикла обсервации и используется в расчете собственных координат разностно-дальномерным методом. Для расчета координат на каждом АНПА фиксируется время прихода навигационных пакетов от других абонентов. Навигационные пакеты от маяков, АНПА или других узлов сети содержат в себе необходимую информацию об объекте, включая координаты объекта и оценку погрешности координат.

В данной работе в разделе 1 приводятся описания алгоритмов решения разностно-дальномерной задачи. Применение РД НС с адаптивной конфигурацией для навигации АНПА в зоне тени рассмотрено в разделе 2. В разделе 3 представлены результаты модельных экспериментов описанных выше алгоритмов. Данные, полученные в ходе морских испытаний работы исследуемой навигационной системы, приведены в разделе 4.

1. Алгоритмы решения разностнодальномерной задачи

Применение РД алгоритмов в работе ГАНС с адаптивной конфигурацией позволяет обойтись без обязательной процедуры предварительной синхронизации часов на абонентах подводной сети. Это дает возможность добавлять в состав группы новые АНПА или маяки непосредственно во время выполнения миссии. Минимальное число опорных точек (маяков) для расчета координат РД методом равняется трем. При работе группы АНПА число абонентов подводной сети может быть больше четырех. Когда в одном обсервационном цикле получены навигационные пакеты от избыточного числа узлов сети, необходимо определить, какие из них использовать для расчета координат. Задача сводится к выбору тех абонентов в качестве опорных точек, которые могут обеспечить наибольшую точность определения координат в текущих условиях. Для решения этой задачи следует опираться на два критерия:

• погрешность координат опорных точек должна быть минимальной,

• геометрия расположения опорных точек относительно объекта обсервации должна обеспечивать наибольшую точность навигации.

Погрешность координат опорных точек оценивается на самих объектах и передается в навигацион-

ных пакетах. Рассчитывается погрешность координат исходя из характеристик навигационной системы объекта и исходя из точности определения его координат внешними системами. Например, погрешность координат стационарных маяков может быть самой высокой и не изменяться с течением времени. Погрешность положения водного аппарата определяется точностью его спутниковой навигационной системы, а погрешность АНПА – характеристиками его навигационных датчиков.

В разрабатываемой навигационной системе предполагается использовать три акустических маяка ГАНС, координаты которых должны быть определены с требуемой точностью и внесены во встроенную память маяков перед началом работ. Первый маяк является ведущим и задает период работы всей системы. С определенным периодом ведущий маяк излучает навигационный пакет, в котором содержатся данные о собственных координатах. Этот обсервационный пакет принимается всеми АНПА, а также вторым и третьим маяками ГАНС. Время прихода обсервационного пакета фиксируется.

Второй и третий маяки являются ведомыми и постоянно находятся в режиме ожидания запроса от ведущего маяка. При получении такого запроса ведомые маяки излучают собственные навигационные пакеты, в которых передают информацию о себе и своих координатах. Эти пакеты также принимаются на всех аппаратах группы с фиксацией времени их прихода. Таким образом, в каждом обсервационном цикле на любом из АНПА фиксируются моменты прихода сигналов от трех маяков ГАНС, а также координаты маяков. И хотя время излучения обсервационного запроса ведущим маяком неизвестно, данных о времени прихода сигналов от трех маяков обычно достаточно для определения координат АНПА разностно-дальномерным способом.

Рассмотрим предлагаемый способ определения координат АНПА по данным о временах прихода сигналов от маяков синхронной ГАНС ДБ путем перебора решений и поиска величины рассинхронизации встроенных часов АНПА относительно часов ведущего маяка.

На входе алгоритма имеем следующие данные:

1) x_i, y_i, z_i – координаты маяков (i = 1, 2, 3);

 с – эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде;

3) t_{A1}, t_{A2}, t_{A3} – времена распространения сигналов, измеренные на борту АНПА по внутренним часам.

Значения $t_{Aj}(j = 1, 2, 3 - номера АНПА)$ связаны с истинными временами распространения сигналов t_1 , t_2 и t_3 в соответствии с формулой:

$$\mathbf{t}_{\mathrm{Aj}} = \mathbf{t}_{\mathrm{j}} + \Delta, \tag{1}$$

где Δ – величина рассинхронизации часов ведущего маяка и часов АНПА. По сути, одной из задач алгоритма является поиск величины рассинхронизации Δ .

Излучение сигналов маяками производится не одновременно, а последовательно (моменты излучения сигналов маяками № 2 и № 3 привязаны к моменту приема сигнала от ведущего маяка № 1). Значения t_1 , t_2 , t_3 зависят от дистанций между маяками и АНПА и от взаимных дистанций между маяками. При этом t_1 – это время распространения сигнала от ведущего маяка № 1 до АНПА; t_2 – суммарное время распространения сигнала по маршруту «маяк № 1 → маяк № 2 → АНПА»; t_3 – суммарное время распространения сигнала по маршруту «маяк № 1 → маяк № 2 → АНПА»;

Если D_{12} и D_{13} – заранее известные дистанции между ведущим маяком № 1 и ведомыми маяками № 2 и № 3, а D_{1A} , D_{2A} , D_{3A} – дистанции между маяками и АНПА, то:

$$t_{1} = D_{1A} / c;$$

$$t_{2} = (D_{12} + D_{2A}) / c;$$

$$t_{3} = (D_{13} + D_{3A}) / c.$$
(2)

Из выражений (2) с учетом соотношений (1) получаем следующие формулы для вычисления расстояний между маяками и АНПА:

$$D_{1A} = (t_{A1} - \Delta) c;$$

$$D_{2A} = (t_{A2} - \Delta) c - D_{12};$$

$$D_{3A} = (t_{A3} - \Delta) c - D_{13}.$$
(3)

С другой стороны, дистанции D_{iA} связаны с координатами маяков (x_i , y_i , z_i) и координатами АНПА (x, y, z) системой уравнений:

$$D_{iA} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$
(i = 1, 2, 3). (4)

Таким образом, если определить величину рассинхронизации Δ , то задачу измерения координат АНПА можно решить обыкновенным методом трилатерации по трем дистанциям до маяков ГАНС путем решения системы уравнений (4).

В реальности дистанции измеряются с некоторыми ошибками и на практике точного решения системы (4), как правило, нет. Поэтому координаты АНПА рассчитываются отдельно для каждой пары маяков (в случае маяков можно составить три пары: 1–2, 1–3 и 2–3). Из полученных в результате вычислений решений можно выделить три наиболее близко сгруппированных решения (точки), образующих «треугольник невязки». Поиск величины рассинхронизации часов выполняется путем перебора решений системы уравнений для различных значений Δ в выражениях (3). В рамках каждой обсервации критерием выбора оптимального значения величины $\Delta_{\text{опт}}$ в предложенном алгоритме является минимум площади «треугольника невязки» для всех пар маяков. Шаг изменения Δ для перебора выбирается исходя из характеристик акустических модемов, а именно в зависимости от точности измерения времени распространения сигнала. При моделировании использовался шаг изменения $\Delta = 1$ мс. Диапазон изменения Δ зависит от максимально возможной величины рассинхронизации, и в предельном случае он может достигать периода обсервации.

На рис. 1 для одной обсервации показаны возможные местонахождения АНПА, полученные по результатам перебора решений для всех возможных Δ в заданном диапазоне. Реальные координаты АНПА на указанной карте находятся в точке (0; 0), а расчетные координаты при различных значениях Δ образуют так называемые «линии положения». Координаты точки пересечения линий положения соответствуют действительному положению АНПА, а величина Δ , с учетом которой были рассчитаны координаты этой точки, отражают реальную величину рассинхронизации часов АНПА и часов ведущего маяка. Первоначально, когда величина рассинхронизации неизвестна, алгоритм требует больших вычислительных ресурсов, и поиск решения может занять несколько секунд. Однако после первого расчета на



Рис. 1. Точка с минимальной площадью треугольника невязки (реальное положение АНПА): 1 – М1-М2, 1-е решение; 2 – М1-М3, 2-е решение; 3 – М1-М2, 2-е решение; 4 – М2-М3, 1-е решение; 5 – М1-М3, 1-е решение; 6 – М2-М3, 2-е решение; 7 – Маяки. Линии положения АНПА (диапазон перебора ∆: [–100, 100] мс)

последующих циклах обсервации диапазон перебора можно значительно уменьшить, в зависимости от характеристик часов (скорости их ухода) и возможных погрешностей измерения дистанций.

Решение разностно-дальномерной задачи аналитическим методом основано на составлении системы уравнений, связывающих координаты АНПА, маяков и измеренные разности времен приема подводным аппаратом акустических сигналов от маяков. Получаемая в результате система нелинейных уравнений решается аналитическим методом.

Пусть для определения координат АНПА используются три маяка M_0 , M_1 и M_2 с известными координатами (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) соответственно. Обозначим (x, y, z) – координаты АНПА, где z– вертикальная координата (глубина), измеряемая с требуемой точностью, а (x, y) – неизвестные горизонтальные координаты АНПА.

Можно записать следующую систему из трех нелинейных уравнений, связывающих координаты АНПА, маяков и измеренные дистанции:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = \tilde{d}_1 - \Delta d \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} = \tilde{d}_2 - \Delta d , \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} = \tilde{d}_3 - \Delta d , \end{cases}$$
(5)

где d_k – рассчитанная наклонная дальность до *k*-го маяка, Δd – систематическая ошибка определения наклонных дальностей, обусловленная рассинхронизацией часов АНПА относительно эталонных часов, задающих режим работы ГАНС.

Полученная система содержит три неизвестных: горизонтальные координаты АНПА (x, y), а также ошибку определения наклонных дальностей Δd . Она может быть сведена к следующей равносильной системе уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \\ -\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = \tilde{d}_2 - \tilde{d}_1 \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \\ -\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = \tilde{d}_3 - \tilde{d}_1 \\ \Delta d = \tilde{d}_1 - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \end{cases}$$
(6)

Система решается стандартным образом, и аналитическое решение в явном виде допускает эффективную программную реализацию.

2. Применение ГАНС с адаптивной конфигурацией для навигации АНПА в зоне тени

Использование для подводной навигации гидроакустических сетей, включающих в свой состав группу АНПА, открывает новые возможности. Измерение взаимных дистанций между АНПА одновременно с измерением дистанций до маяков ГАНС повышает точность определения координат и надежность работы ГАНС в целом. Это может быть полезно в случаях, когда один или несколько АНПА в группе оказываются за пределами прямой слышимости некоторых маяков ГАНС. Область, в которой АНПА не принимает сигналы от отдельных маяков, называют зоной акустической тени.

Свойства РД ГАНС с адаптивной конфигурацией позволяют обеспечить навигацию групп АНПА в условиях, когда АНПА находится в зоне тени и не слышит один или несколько стационарных маяков, но принимает сигналы от других АНПА. Тогда в роли маяков выступают подводные аппараты, имеющие на момент обсервации наименьшую погрешность собственных координат и наилучшее положение относительно объекта обсервации.

Представленные ниже алгоритмы предназначены для случаев, когда часть аппаратов группы (абонентов подводной сети) находится в зоне действия маяков РД ГАНС, а другая часть аппаратов или один аппарат находится вне зоны слышимости маяков (рис. 2).



Циклограмму работы системы можно описать следующим образом. Ведущий маяк В1 задает период обсервации, в котором опрашивает другие маяки. Кроме того, в каждом цикле обсервации ведущий маяк опрашивает один из аппаратов, входящих в группу (это необходимо, чтобы контролировать положение и состояние аппаратов). Опрос аппаратов производится поочередно, то есть в первом цикле опрашивается первый АНПА, в следующем цикле второй и так далее. В ответных посылках аппараты сообщают свои параметры, в том числе координаты. Ответные посылки аппаратов синхронизированы с ведущим маяком. В результате в каждом цикле обсервации все АНПА группы получают не только сигналы маяков РД ГАНС, но и ответную посылку от одного из аппаратов. Таким образом, для определения собственных координат по разностно-дальномерным измерениям на АНПА можно использовать не только сигналы маяков, но и сигналы от других аппаратов. Возможны различные ситуации, когда АНПА не получает навигационные сигналы от одного или нескольких маяков. Система в любом случае будет работать, если на АНПА при отсутствии сигналов от маяков фиксируются сигналы и измеряются дистанции до других АНПА. В этом случае другие АНПА воспринимаются как подвижные маяки. Однако необходимо, чтобы общее число доступных узлов подводной сети не было меньше трех.

Алгоритм определения координат АНПА в зоне акустической тени имеет отличие от описанного ранее. Модификация алгоритма производилась с целью учесть в расчетах движение аппаратов, выполняющих функцию мобильных маяков во время обсерваций. Также следует отметить, что опрос аппаратов при работе подводной сети производится не синхронно, а последовательно по определенному расписанию.

Расчет дистанций между опорными точками и АНПА А1 производится по следующим формулам в цикле перебора по параметру Δ :

$$D_{1} = c * (t_{12} + \Delta)$$

$$D_{2} = c * (t_{2} + \Delta) - d_{12},$$

$$D_{3} = c * (t_{3} + (t_{13} - t_{12}) + \Delta) - d_{13},$$
(7)

где D_1 , D_2 и D_3 – дистанции между АНПА и узлами, по которым координируется АНПА A1; t_{12} – время прихода сигнала от маяка мастера до АНПА A1 в первом цикле обсервации, t_2 – время прихода сигнала от АНПА A2 до АНПА A1 в первом цикле обсервации, t_{13} – время прихода сигнала от маяка мастера до АНПА A1 во втором цикле обсервации, t_3 – время прихода сигнала от 3-го АНПА до АНПА A1 во вто-



Рис. 3. Ошибки определения координат АНПА в эксперименте № 1: 1 – ДБ ГАНС метод; 2 – дальномерно-разностный переборный метод

ром цикле обсервации; d₁₂ и d₁₃ – дистанции между маяком-мастером и соответствующим АНПА; Δ – величина рассинхронизации часов; с – эффективная скорость распространения звукового сигнала в воде.

После завершения процедуры перебора решений и поиска оптимальной величины рассинхронизации полученное значение Δ помещается в массив предыстории для отбраковки ложных значений и осреднения. Далее на основе полученной оценки Δ измеренные дистанции до маяка В1 и аппаратов А2, А3 пересчитываются, и задача решается методом трилатерации.

3. Результаты модельных экспериментов

На начальном этапе исследование работы разработанных алгоритмов было выполнено с помощью компьютерного моделирования. По условиям моделирования маяки ГАНС устанавливались на расстоянии от 500 до 1000 м друг от друга. АНПА двигался по квадрату со скоростью 1 м/с. Период обсервации составлял 30 с.

В эксперименте №1 при исследовании переборного алгоритма величина случайной погрешности измерения времен распространения сигналов составляла 5 мс. На рис. 3–4 показаны полученные результаты моделирования. Координаты маяков: М1 0; -500; М2 0;500; М3 500;500. Зеленые точки – реальные координаты АНПА во время обсерваций. Синими ромбами, для сравнения, обозначены координаты АНПА, рассчитанные классическим методом трилатерации для дальномерной ГАНС ДБ. Красными кружками обозначены координаты АНПА, полученные для разностно-дальномерной ГАНС методом перебора с применением фильтра, обеспечивающего интегрирование полученных значений величины рассинхронизации Δ. Среднее отклонение от реаль-

ных значений координат для разностно-дальномерного метода с перебором решений составило 3,67 м. Для классической дальномерной ГАНС ДБ при тех же условиях среднее отклонение составило 3,62 м.

В эксперименте № 2 условия моделирования были изменены. В заданную скорость звука была введена ошибка 20 м/с. Величина случайной погрешности измерения времен распространения сигналов составляла 2 мс. На рис. 5–6 показаны полученные результаты моделирования. На рис. 7–8 приведены результаты моделирования работы переборного и аналитического алгоритмов в ходе эксперимента № 3, когда часть траектории АНПА пролегает вдали от маяковых баз ГАНС. Заданные погрешности измерения времен распространения сигналов – также



Рис. 4. Траектории движения АНПА, полученные различными методами в эксперименте № 1: 1 – ГАНС ДБ по трем маякам; 2 – дальномерно-разностный ГАНС переборный метод с осреднением; 3 – реальная траектория АНПА



Рис. 6. Ошибки определения координат АНПА в эксперименте № 2: 1 – ДБ ГАНС метод; 2 – дальномерно-разностный переборный метод



Рис. 5. Траектория движения АНПА, полученная в эксперименте № 2 (скорость звука задана с ошибкой 20 м/с): 1 – ГАНС ДБ по трем маякам; 2 – дальномерно-разностный ГАНС переборный метод с осреднением; 3 – реальная траектория АНПА. Координаты маяков: М1 0; –500, М2 0;500, М3 500;500



Рис. 7. Траектория движения АНПА, рассчитанная для траектории, уходящей далеко от маяковых баз: 1 – переборный метод без осреднения и аналитический метод; 2 — аналитический метод:вторые решения; 3 – реальная траектория АНПА; 3 – маяки; 4 – переборный метод с осреднением. Координаты маяков: М1 0;0, M2 200;0, M3 100;200



Рис. 8. Ошибки определения координат АНПА в эксперименте № 3: 1 – аналитический метод; 2 – ДБ ГАНС метод; 3 – переборный метод с осреднением; 4 – переборный метод без осреднения дельта

2 мс. Для сравнения приведены данные расчета методом перебора с применением фильтра и без применения фильтра. Очевидно, что фильтрация полученных значений Δ в таких условиях необходима. Также ясно, что при применении разностно-дальномерного метода следует уделять особое внимание рациональному расположению маяковой базы.

Полученные в ходе моделирования данные показывают, что переборный и аналитический алгоритмы дают практически одинаковые решения: расстояния между найденными точками не превышают 1 м. Данная ошибка обусловлена конечным шагом перебора параметра рассинхронизации, равным 1 мс.

Результаты, полученные для переборного алгоритма в ходе модельных экспериментов № 1–3, приведены в таблице. В целом переборный метод для разностно-дальномерной ГАНС показал результаты, сопоставимые с классической дальномерной ГАНС. В некоторых случаях точность измерения координат данного алгоритма оказалась даже выше в связи с тем, что он частично компенсирует погрешность, связанную с ошибкой задания скорости звука.

В рамках модельного эксперимента определения местоположения АНПА в зоне тени имитировалась работа трех АНПА и трех навигационных маяков. Схема размещения маяков и движения АНПА представлена на рис. 9. Расстояние между маяком В1 и маяками В2 и В3 составляло около 2 915 м, расстоя-

	Условия эксперимента		
Среднее отклонение координат от истинных значений	Погреш- ность фиксации моментов прихода откликов MO 5 мс	Погрешность фиксации моментов прихода откликов МО 2 мс; ошибка скорости звука 20 м/с	Погрешность фиксации мо- ментов при- хода откликов MO 2 мс; удаленная база маяков
Среднее отклонение координат для разност- но-дальномер- ной ГАНС с перебором решений, м	3,62	6,64	5,74
Среднее отклонение координат для дальномерной ГАНС, м	3,67	12,9	3,55

Погрешность определения координат



Рис. 9. Схема модельного эксперимента

ние между маяками В2 и В3 составляло 3 000 м. Период опроса маяком В1 остальных маяков и АНПА равнялся 5 с.

АНПА А1 двигался по траектории типа «меандр», заполняющей квадрат размером 1000 × 1000 м (длина основного галса 1000 м, шаг меандра 100 м), со скоростью 1 м/с.

Траектория АНПА А2 представляла собой квадрат со стороной 500 м, скорость движения АНПА составляла 0,8 м/с, направление движения – против часовой стрелки.

АНПА АЗ также выполнял движение против часовой стрелки по сторонам квадрата 1000 × 1000 м со скоростью 1 м/с.

Ошибки измерения времен прихода сигналов моделировались как равномерно распределенная на отрезке [-1 ms, +1 ms] случайная величина.

На рис. 10, *а-в* представлены графики ошибок определения местоположения подводных аппаратов A1–A3 при помощи РД ГАНС на базе маяков B1, B2, B3 в ходе выполнения миссии. Видно, что в среднем ошибка определения местоположения составляет около 1 м.

На рис. 11, a-в приведены графики ошибок определения местоположения подводного аппарата A1 при помощи РД ГАНС, когда вместо маяка B2 выступает АНПА A2 (рис. 11, a) и когда функцию маяка B3 исполняет АНПА A3 (рис. 11, δ). При этом сами АНПА A2 и A3 определяют свое местоположение при помощи маяков B1, B2, B3, и при расчете координат АНПА A1 используются рассчитанные координаты АНПА A2 и A3. Видно, что ошибка определения местоположения аппарата A1 в этих случаях немного возрастает (среднее значение составляет около 1,2 м и 1,4 м соответственно).

На рис. 12 изображены графики ошибок определения местоположения подводного аппарата A1 при помощи системы счисления пути (ССП) и при помощи РД ГАНС, когда в роли маяка B2 выступает АНПА A2, а функцию маяка B3 исполняет АНПА A3. При этом сами АНПА A2 и A3 по-прежнему определяют свое местоположение при помощи маяков B1, B2, B3, и при расчете координат АНПА A1 используются рассчитанные координаты АНПА A2 и A3. В этой ситуации ошибка определения местоположения аппарата A1 еще немного возрастает, и среднее значение ошибки составляет примерно 1,6 м. При этом за время миссии (3 ч 20 м) ССП накопила ошибку около 30 метров. «Пилообразный» характер ошибки ССП связан с наличием наряду с девиационной составляющей ошибки измерения курса (от $-0,25^{\circ}$ до $+0,25^{\circ}$) еще и постоянной составляющей ошибки определения курса $-0,5^{\circ}$, а также введением в измерения продольной скорости движения АНПА постоянной ошибки +0,01 м/с. Постоянные составляющие ошибок измерения курса и продольной скорости движения АНПА определяют размах «пилы», но на взаимно противоположных галсах компенсируют друг друга, тогда как наличие девиационной составляющей в общем случае обеспечивает постепенное накопление общей ошибки ССП даже на замкнутых траекториях.

На рис. 13 представлены графики с траекториями движения подводного аппарата А1 по данным ССП (розовая линия) и по данным РД ГАНС, когда в роли маяка В2 выступает АНПА А2, а функцию маяка В3 исполняет АНПА А3 (темно-синие маркеры).



Рис. 10. Ошибка определения при помощи РД ГАНС на базе маяков В1, В2, В3 местоположения АНПА А1 (а), А2 (б) и А3 (в)



Рис. 11. Ошибка определения местоположения АНПА А1 при помощи РД ГАНС на базе маяков В1, В3 и АНПА А2 (а) и на базе маяков В1, В2 и АНПА А3 (б)





Необходимо отметить, что все приведенные выше результаты представляют собой исходные данные, не подвергнутые какой-либо дополнительной обработке (фильтрации, комплексированию с данными бортовой автономной навигационной системы и т.п.). Тем не менее даже в необработанном виде они демонстрируют достаточно высокое качество определения местоположения АНПА. Использование этих данных и их введение в контур комплексирования навигационной информации позволит эффективно осуществлять коррекцию местоположения и более точно оценивать его текущее местонахождение.

4. Результаты предварительных натурных испытаний алгоритмов разностнодальномерной ГАНС

Осенью 2019 года в акватории залива Петра Великого были проведены предварительные натурные эксперименты с целью испытания работы алгоритмов навигации группы АНПА и апробирования протоколов связи подводной сети на базе разработанных гидроакустических модемов. Для организации эксперимента использовались следующие технические средства:

• четыре гидроакустических модема Aqua Telecom [23–24] в прочных корпусах, разработанных совместно ДВФУ и ИПМТ (рис. 14);

• имитатор АНПА;

 программное обеспечение, реализующее протоколы связи и алгоритм взаимодействия абонентов ГА сети; • программное обеспечение, реализующее алгоритмы РД ГАНС.

На рис. 15 изображена схема расположения элементов сети РД ГАНС. Маяковая база системы включала в себя три маяка, построенных на базе созданных ГА модемов. Один из маяков являлся ведущим и имитировал стационарный маяк, два других маяка были ведомыми и имитировали автономные необитаемые водные аппараты (АНВА). Четвертый ГА модем располагался на имитаторе АНПА. В ходе эксперимента имитатор АНПА осуществлял движение внутри образованного маяками треугольника (см. рис. 15). Координаты точек постановки всех трех маяков, а также имитатора АНПА в ходе эксперимента измерялись при помощи высокоточного приемника спутниковой навигации, работающего в режиме кинематики реального времени и получающего дифференциальные поправки от развернутой на берегу базовой станции. При помощи мобильного ГА модема на имитаторе АНПА были произведены измерения моментов прихода акустических сигналов для 20 циклов работы РД ГАНС.

На основе полученных в натурном эксперименте данных был выполнен расчет координат точек нахождения имитатора АНПА разностно-дальномерным методом и произведено их сравнение с координатами, полученными от высокоточного приемника СНС.

На рис. 16 приведен график изменения во времени расстояния между точками местонахождения имитатора АНПА, полученными на основе данных РД ГАНС и приемника спутниковой навигации DGPS.



Рис. 13. Траектории движения АНПА А1: по данным ГАНС (синие маркеры) и по данным ССП (розовая линия)



Рис. 14. Комплект используемых в ходе эксперимента гидроакустических модемов AquaTelecom (разработаны совместно ДВФУ и ИПМТ)



Рис. 15. Траектория движения мобильного модема (имитатора АНПА) по данным DGPS (розовая линия) и его местоположение, рассчитанное на основе измеренных разностей моментов прихода сигналов от маяков (РД ГАНС): 1 – маяки, 2 – АНПА по данным ГД ГАНС, 3 – АНПА по данным DGPS

В результате проведенных натурных испытаний получены следующие результаты:

• подтверждена работоспособность разработанных протоколов связи;

 проверено программное обеспечение, реализующее алгоритмы взаимодействия абонентов подводной ГА сети; • получены точностные характеристики ГА модемов при измерении дистанций;

• в морских условиях исследована работа алгоритмов РД ГАНС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход позволяет обеспечить одновременную навигацию для всех АНПА в группе без использования дорогостоящих систем точного времени за счет организации работы ГАНС в разностно-дальномерном режиме. Работоспособность разработанных алгоритмов решения РД задачи исследована в модельных и натурных экспериментах.

Достоинством обоих разработанных алгоритмов является то, что кроме оценки координат АНПА производится оценка величины рассинхронизации часов АНПА относительно часов ведущего маяка. Благодаря этому можно постоянно синхронизировать работу часов АНПА и при кратковременной потере сигналов от одного из маяков переходить к расчету координат по дистанциям до двух других маяков (как в синхронных ГАНС ДБ).

Важным элементом предложенной схемы навигации является применение в качестве маяков разработанных ГА модемов со встроенной функцией измерения времен распространения сигналов. Возможность информационного обмена во время навигационных обсерваций позволяет строить высокомобильные, реконфигурируемые и адаптивные подводные сети. При этом узлами такой сети могут быть не только стационарные донные маяки, но и поверхностные водные аппараты и даже другие АНПА, координаты которых передаются в информационном пакете.



Рис. 16. Расстояния между точками местонахождения имитатора АНПА, полученными на основе данных от РД ГАНС и от приемника спутниковой навигации DGPS

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк Д.А., Щербатюк А.Ф. О методах обеспечения навигации групп АНПА: краткий обзор // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 27–36.

2. Matos A., Cruz N. Simultaneous acoustic navigation of multiple AUVs // Conference: MCMC – Maneuvering and Control of Marine Crafts. Lisbon, Portugal, 2006. P. 1–6.

3. Melo J., Matos A. Towards LBL positioning systems for multiple vehicles // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. China, Shanghai, 2016. P. 1–8.

4. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф., Щербатюк Д.А. Некоторые результаты моделирования алгоритмов разностно-дальномерной ГАНС для обеспечения навигации групп АНПА // Материалы докладов VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2019. С. 111–119.

5. Matos A., Cruz N. Coordinated Operation of Autonomous Underwater and Surface Vehicles // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2007. Vancouver, Canada, 2007. P. 1–6.

6. Melo J., Matos A. Guidance and Control of an ASV in AUV Tracking Operations // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008, Quebec, Canada, 2008. P. 1–7.

7. Santos N., Matos A., Cruz N. Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle in a Mobile Network // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008. Quebec, Canada, 2008. P. 1–5.

8. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J. Cooperative AUV Navigation using a Single Surface Craft // Field and Service Robotics: Results of the 7th Int. Conf. Cambridge, USA, 2009. P. 331–340.

9. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft // The International Journal of Robotics Research. 2010. Vol. 29, Iss 12. P. 1–27.

10. Papadopoulos G., Fallon M., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative Localization of Marine Vehicles using Nonlinear State Estimation // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 2010. P. 1–6.

11. Bahr A., Walter M.R., Leonard J.J. Consistent Cooperative Localization // Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 2009. P. 1–8.

12. Bahr A., Leonard J.J., Fallon M.F. Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles // TheInternational Journal of Robotics Research. 2009. Vol. 28. No. 6. P. 714–728.

13. Bahr A, Leonard J, Martinoli A. Dynamic Positioning of Beacon Vehicles for Cooperative Underwater Navigation // Proceedings of the IEEE/ RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 1–8.

14. Tan Y., Gao R., Chitre M. Cooperative Path Planning for Range-Only Localization Using a Single Moving Beacon // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 2014. Vol. 39. No. 2. P. 1–15.

15. 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, 10–12 April 2012, FEUP, Porto, Portugal. 2012. Vol, 45. Iss 5. P. 1–6.

16. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon: The results of simulation and sea trials // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 7, Iss 2. P. 189–196.

17. Sergeenko N., Scherbatyuk A., Dubrovin F. Some Algorithms of Cooperative AUV Navigation with Mobile Surface Beacon // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2013, San-Diego, USA, 2013. P. 1–6.

18. Gao R., Chitre M. Cooperative Positioning using Range-Only Measurements Between Two AUVs // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2010. Sydney, NSW, Australia, 2010. P. 1–6.

19. Chitre M. Path planning for cooperative underwater range-only navigation using a single beacon // Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Autonomous and Intelligent Systems (AIS). Burnaby, Canada, 2010. P. 1–6.

20. Teck T., Chatre M. Single Beacon Cooperative Path Planning Using Cross-Entropy Method // Proceedings of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2011. Kona, USA, 2011. P. 1–6.

21. Hudson J., Seto M. Underway Path-planning for an Unmanned Surface Vehicle Performing Cooperative Navigation for UUVs at Varying Depths // Proceedings of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2014. Chicago, IL, USA, 2014. P. 2298–2305.

22. Кебкал К.Г. и др. Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов. // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 4–12.

23. Кулик С.Ю., Родионов А.Ю., Дубровин Ф.С., Унру П.П. Оценка достоверности передачи информации и точности определения дистанции подвижными гидроакустическими модемами для обеспечения навигации и связи подводных объектов // Материалы 25-й междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (МКИНС 2018). Санкт-Петербург, 2018. С. 1–4.

24. Кулик С.Ю., Родионов А.Ю., Голов А.А., Унру П.П. Оценки применения многочастотных сигналов с постоянной огибающей в гидроакустических системах связи // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 30–38.

