

КОНЦЕПЦИЯ СОВМЕСТНОЙ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В РАЗНЫХ СРЕДАХ

Амосов О.С., Амосова С.Г.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65
osa18@yandex.ru, amosovag@yandex.ru

Аннотация: Предлагается концепция построения системы совместной навигации и связи гетерогенной группы автономных беспилотных аппаратов, работающих в разных средах. Концепция опирается на теорию мультиагентных систем. Приводятся структурная схема для мультиагентной системы, схема комплексирования объектов по данным геофизических полей, маяков и других доступных измерителей.

Ключевые слова: автономный беспилотный летательный, надводный и подводный аппарат, навигация, связь, мультиагентная гетерогенная система.

Введение

Ведущие страны мира активно ведут разработки смешанной, гетерогенной группы автономных беспилотных аппаратов (АБА), работающих в различных средах (под водой, на воде, в воздухе) и взаимодействующих в едином информационно-управляющем пространстве. Согласованное взаимодействие такой группы требует реализации каналов информационного обмена, обладающих высокой надежностью и пропускной способностью для создания высокоэффективных алгоритмов согласованной навигации АБА.

Наиболее востребованным для автономных беспилотных аппаратов является метод навигации по геофизическим полям (ГФП) в случае невозможности использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и других радиотехнических средств измерений [1, 2].

Среди активных применений метода навигации с использованием карт местности прежде всего стоит назвать военные приложения. Это: наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов для ударных целей (нанесение точечных ударов), разведывательных (местопределение подвижных объектов, контртеррористические операции) и охранных функций (целеуказание, постановка помех, ретрансляция сигналов) [3–6]; задача обеспечения группового полета, радиационный и газохимический контроль [7]; наведение крылатых ракет и управление высокоточными ракетными комплексами [8]; определение местоположения вертолета [9]; система доставки оружия [10].

Широкое применение находит метод навигации по ГФП в различного рода автономных робототехнических системах, наземных транспортных средствах [1, 2, 11–15]. В последнее время актуальным приложением является пешеходная навигация, навигация внутри помещений [16–19].

Особенно актуален метод навигации по геофизическим полям и маякам, когда невозможно использование спутниковых и радиотехнических средств, для автономных беспилотных подводных аппаратов (АБПА) [20–23].

Поэтому основной акцент сделан нами на анализе трудностей, возникающих при решении задачи навигации для указанного класса аппаратов. Основная трудность заключается в непрозрачности водной среды для обычных видов излучения, за исключением акустических волн. Таким образом, акустические датчики являются единственным инструментом для внешних измерений ориентации и положения АБПА. Другая трудность заключается в непостоянстве скорости распространения акустических волн, которая зависит от температуры, солености и давления. По этой причине только слияние данных акустических измерений с данными других датчиков бортовой инерциальной навигационной системы может обеспечить необходимое качество и надежность оценки.

Системы подводного акустического позиционирования обычно делятся на три широких класса [23, 24]: системы с длинной базой (long baseline, LBL) – точность 0,1–1 м [25], короткой базой (short baseline, SBL) – точность до 0,1 м [26] и ультракороткой базой (ultra-short baseline, USBL) – точность до 1 м [27]. Эти подходы основаны на измерении дальности до нескольких (трех и более) разнесенных акустических маяков с известными координатами. В зависимости от реальной дальности действия АБПА и соответствующей миссии необходимо применять различные методы и различные размещения маяков [28].

Если угроза обнаружения АБПА не имеет значения, то можно использовать массив акустических преобразователей с известными координатами, которые принимают акустический сигнал от источника АБПА. Например, конфигурации в виде систем интеллектуальных буев ГНСС (например, GPS

intelligent buoy, GIB) представляют собой перевернутые устройства LBL, в которых датчики заменены плавучими буями, самоопределяющимися с помощью GPS [29]. Отслеживаемое положение рассчитывается в режиме реального времени на поверхности по времени прихода акустических сигналов, отправленных подводным устройством, и полученных буями. Такие конфигурации обеспечивают быстрое развертывание без калибровки с точностью, аналогичной системам LBL. В отличие от систем LBL, SBL или USBL, системы GIB используют односторонние акустические сигналы от излучателя к буям, что делает их менее чувствительными к отражениям от поверхности или стен. Такие системы можно использовать для отслеживания АБПА, торпед или водолазов, для локализации черных ящиков самолетов, мин.

Определение положения подводного аппарата при отсутствии внешних измерений требует использования возможностей бортовой инерциальной навигационной системы (ИНС), позволяющей оценить текущую скорость и направление движения в глобальной системе координат [30]. Однако датчики ИНС склонны к дрейфу, и в течение нескольких минут могут возникнуть огромные ошибки интегрирования. Дополнительные измерения могут облегчить эти проблемы и исправить ошибки ИНС. В современных приборах, как правило, используются доплеровские измерители скорости или их аналоги, позволяющие измерять скорость на основе эволюции изображения морского дна, полученного с помощью гидролокаторов или акустических профилографов. Использование доплеровских датчиков в ИНС [31] дает плодотворные результаты в точности измерения пространственного положения [32], что включает небольшую разницу в масштабных коэффициентах в каналах порядка 10^{-3} и небольшой уклон в каналах тангажа, крена и рыскания.

Как и в надводной GPS, для подводной системы позиционирования требуется создание сети узлов (акустических буюв или транспондеров) с известным и очень стабильным положением. Неизвестное положение аппарата определяется из системы уравнений, связывающих неизвестное положение аппарата и времена распространения акустического сигнала между АБПА и узлами [33]. Так, например, система подводного GPS-позиционирования с комбинацией ультракороткой базы USBL и гидролокатора переднего обзора (forward-looking sonar, FLS) [34] осуществляет позиционирование в реальном времени случайных и неизвестных целей в любой акватории, указывает координаты широты и долготы в системе координат WGS84 (World Geodetic System 1984) и демонстрирует очень хорошую мобильность при точности 1,2 м.

Недавно появились интересные биологические методы подводного позиционирования [35]. Оптические методы неприменимы непосредственно к подводным приложениям из-за чрезвычайно быстрого поглощения электромагнитного излучения в воде, поэтому остаются некоторые особенности оптических волн, которые могут быть пригодны для навигации. Среди них цвет и поляризация с достигаемой точностью позиционирования примерно 6 м на пройденный километр [35].

Видеосъемка в подводных аппаратах невозможна, поскольку непрозрачность водных сред позволяет наблюдать за объектами только на расстоянии менее 5 м. Поэтому в работе [23, 36, 37] авторы предложили метод управления и навигации АБПА основанный на карте расстояний от акустического гидролокатора до морского дна с помощью сонара высокого разрешения. Алгоритм определения местоположения сформулирован на основе счисления пути со скоростью, оцениваемой по эволюции «акустических образов» в виде набора донных расстояний. Методы, основанные на оптическом потоке для подводных аппаратов, еще нуждаются в доработке и не могут быть применены напрямую, поэтому данное направление еще развивается.

В настоящее время огромный практический интерес вызывает одновременная локализация и картографирование (Simultaneous Localization And Mapping, SLAM). Для автономных подводных аппаратов SLAM стал важным методом для осуществления долговременной навигации [38–40]. Однако использование только батиметрических данных в неизвестной среде имеет свои недостатки, которые заключаются в низкой точности и большой вычислительной нагрузке. Для удовлетворения требований высокоточной навигации в условиях крупномасштабного и длительного рейса предложен метод SLAM и соответствующий алгоритм сопоставления для интеграции данных из нескольких геофизических полей.

Новые подходы для оценивания начинают развиваться на основе машинного обучения, нейронных сетях. Работ использования нейронных сетей для обработки видеоизображений много для авиационных и наземных приложений [41–44] и сравнительно немного для обработки данных геофизических полей [45–46]. Так, например, в работе [38] используются глубокие нейронные сети долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) для идентификации сегментов навигационных данных, полученных методом SLAM по трем геофизическим полям (батиметрическое, гравитационное, магнитное). Согласно сравнению с результатами сопоставления с использованием

данных одного физического поля, точность сопоставления предлагаемого метода значительно выше для навигации в дальних рейсах. Эта работа демонстрирует осуществимость предлагаемого метода с теоретической точки зрения, но его практическое применение нуждается в дальнейшей проверке.

В настоящее время среди алгоритмов машинного обучения наибольшее внимание уделяется в силу его эффективности нейросетевому (глубокому) обучению.

При создании нейросетевых алгоритмов оценивания в рамках байесовского подхода используется обучение с учителем. Для их адаптации в режиме on-line используется в рамках метода наименьших квадратов обучение с подкреплением.

Указанные методы предстоит еще развивать, поэтому одной из задач предстоящих работ является глубокая проработка нейросетевого способа адаптации алгоритмов оценивания стохастических процессов применительно к задачам обработки навигационной информации с использованием ГФП, маяков, комплексирование информации. Необходимо проработать нейросетевые алгоритмы фильтрации: при обучении с учителем в рамках байесовского подхода и при обучении с подкреплением в рамках метода наименьших квадратов.

В настоящее время решение задач навигации и связи между разнородными АБА имеют решающее значение в мировой практике в связи с их бурным развитием и применением. Наиболее актуально применение АБПА в арктических районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок [47].

В этом смысле основными мировыми конкурентами являются страны, в которых на развитие методов навигации и связи расходуются значительные суммы и количество соответствующих высококлассных специалистов велико (США, Великобритания, Китай, Япония, Канада, Европейские страны, Австралия, Бразилия).

Создание класса качественно новых алгоритмов навигации может быть достигнуто за счет преимуществ надежной безопасной связи между аппаратами и на этой основе использование новых схем комплексирования для гетерогенной группы беспилотных аппаратов.

На согласованное поведение (взаимодействие) гетерогенной группы беспилотных аппаратов существенное влияние оказывают два фактора:

1) связь между разнородными аппаратами, находящимися в разных средах, а именно в воздушной, поверхностной и подводных средах;

2) навигация не одиночных аппаратов, а группы (стаи).

Наличие надежной безопасной связи между объектами позволяет:

1) обмениваться навигационной информацией между аппаратами для улучшения точности выработки навигационных параметров;

2) координировать действие группы аппаратов для выполнения единой цели.

В работе [48] для системы подводного позиционирования на основе маяков, оснащенных GPS и акустическими преобразователями, рассмотрены различные ошибки измерений, связанных с условиями окружающей среды и геометрическими конфигурациями. Для улучшения обнаружения акустических сигналов предлагается использовать коды Kasami, которые способствуют получению более точной оценки расстояний между узлами, усилению процесса связи по сравнению с шумом и обеспечению многопользовательских возможностей. Подводные аппараты реагируют на один и тот же код от надводного судна, используя хорошие свойства взаимной корреляции определенных схем кодирования с помощью кода Kasami, поэтому протокол временной защиты не требуется.

В работах [49, 50] предлагается подход демонстрирующий разработку и развертывание синхронно-тактовой акустической навигационной системы, пригодной для одновременной навигации нескольких подводных аппаратов. Их навигационная система состоит из системы связи и навигации на основе акустического модема, которая позволяет передавать бортовые навигационные данные в виде пакета данных узлом-источником, а все пассивно принимающие узлы могут декодировать пакет данных для получения одного измерения псевдодальности пути-времени и навигационные эфемеридные данные. Описанный метод навигации использует надводное судно, выступающее в качестве единственного движущегося эталонного маяка для группы пассивно прослушивающих подводных аппаратов.

Преимущества этого типа навигационной системы заключаются в том, что она может одновременно управлять несколькими подводными аппаратами в непосредственной близости от надводного судна и обеспечивать измерение положения по осям XY с ограниченной погрешностью, которое соизмеримо с обычными навигационными системами с длинной базой (LBL) (т.е. 1 м), но, в отличие от LBL, он географически не ограничен сетью с фиксированными радиомаяками.

Как показывает практика последнего времени, именно развитие мультиагентных систем (МАС) [47, 51] призвано стать эффективным инструментом решения задач в различных областях, в том числе и

при решении задач совместной навигации АБА. Но теория и технологии построения интеллектуальных МАС с агентами, работающими в разных средах, оставляют желать лучшего в силу их незаконченности.

Поэтому **целью статьи** является разработка на основе теории мультиагентных систем концепции совместной навигации и связи гетерогенной группы беспилотных аппаратов по данным геофизических полей и маяков в сочетании с другими средствами.

1 Постановка задачи

Предложить концепцию совместной навигации гетерогенной группы автономных беспилотных аппаратов, находящихся в разных средах с помощью эффективных по точности и быстродействию алгоритмов по данным геофизических полей и маяков в сочетании с другими средствами, в частности, с акустическими средствами для подводных аппаратов, информации от интеллектуальных маяков, роль которых может быть выполнена летательными АБА с приводнением и способных обеспечить передачу точных координат своего местоположения и данных от спутниковых, радиотехнических систем при использовании надежной безопасной системы связи между аппаратами.

Для этого необходимо определить задачи и установить общие требования к построению системы навигации и связи, составу ее компонентов, алгоритмам и методам решения задач.

2 Концепция совместной навигации и связи гетерогенной группы автономных беспилотных аппаратов

2.1 Структурная схема концепции

На рисунке 1 представлена схема взаимодействия гетерогенных автономных беспилотных аппаратов (АБА) в трех средах: на воде, под водой и в воздухе. Объекты состоят из автономных беспилотных подводных аппаратов (АБПА), автономных беспилотных надводных аппаратов (АБНА), автономных беспилотных летательных аппаратов (АБЛА), эталонных маяков, акустических, спутниковых и радиолокационных средств.

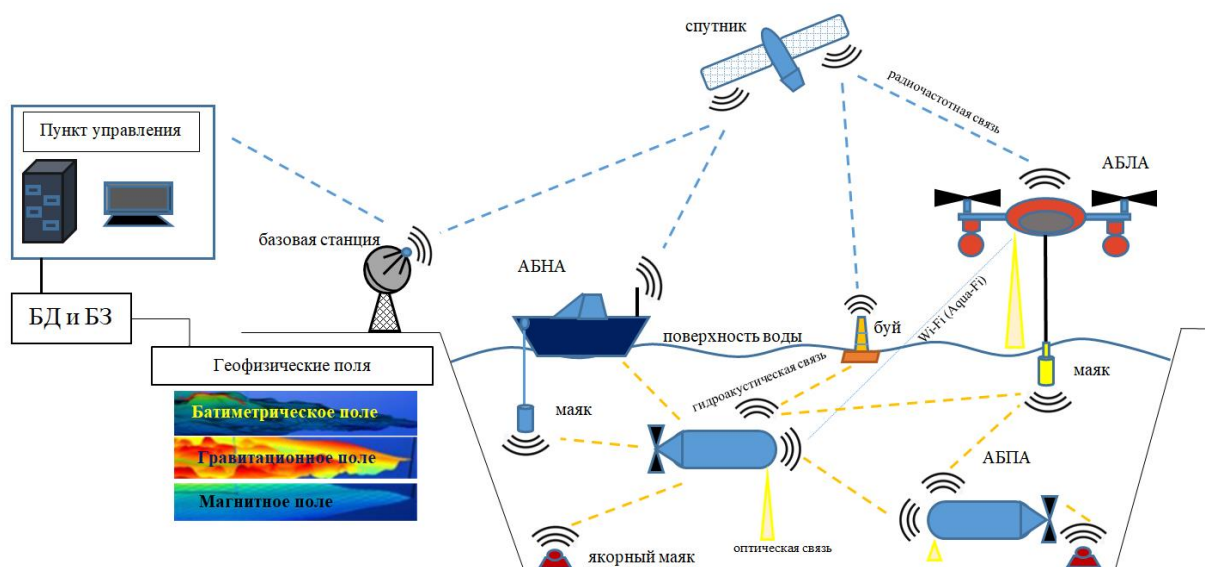


Рис. 1. Схема взаимодействия гетерогенных АБА в трех средах

Такая система может быть промоделирована на основе агентного подхода [52]. В виде агентов выступают: АБА, маяки, система спутниковой навигационной, радиотехнической, оптической и акустической аппаратуры потребителя для измерений положения, система связи, пункт управления (при наличии).

В агентном моделировании сначала устанавливаются параметры активных объектов — агентов, и определяется их поведение. Агент помещен в определенную среду, живет в ней и взаимодействует с другими агентами. Для взаимодействия агенты имеют коммуникационные протоколы. Агенты способны реагировать на среду, распознавать и различать других агентов. Поведение агентов происходит по сценарию. Сценарий – это картина последовательного развития событий во времени и в пространстве.

Предлагается для решения задач навигации гетерогенных групп автономных беспилотных аппаратов концепция в виде структурной схемы (рис. 2).

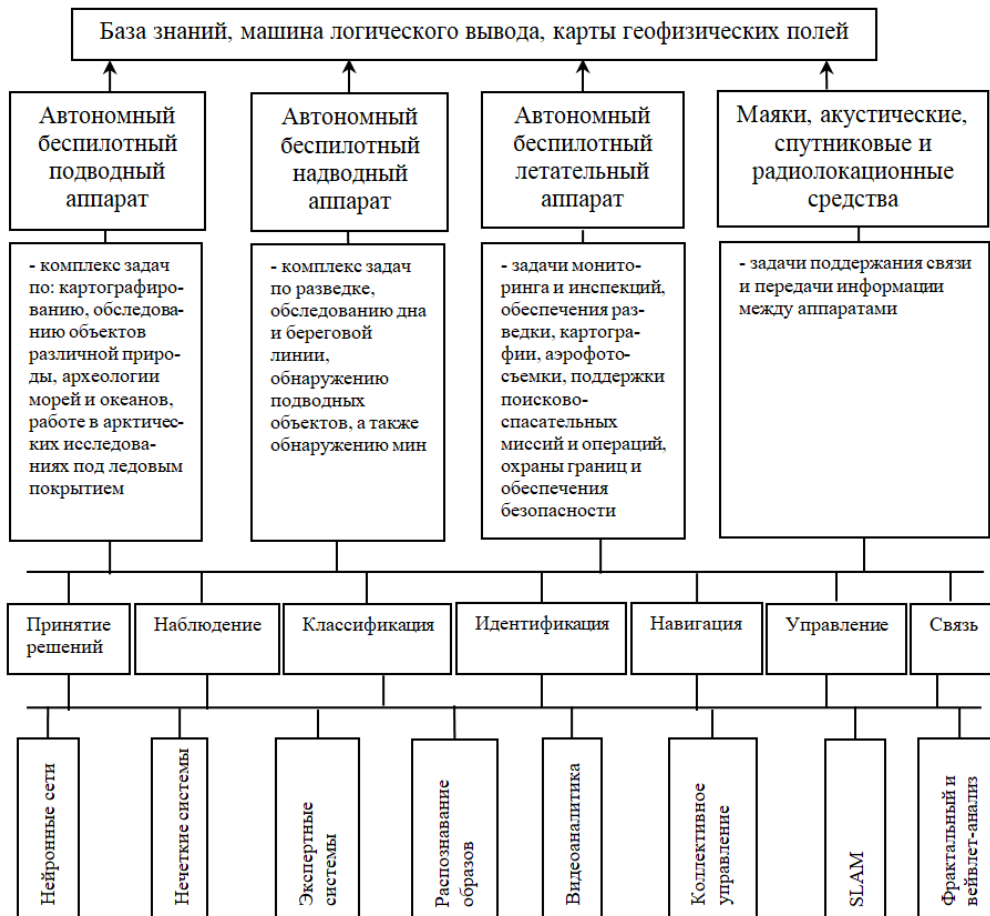


Рис. 2. Структурная схема концепции

2.2 Математическая модель МАС

Представленная на рис. 2 система \mathcal{S} , состоит из n разнородных объектов $Ag = \{a_k, k = 1, \dots, n_a\}$, функционирующих в разных средах $\mathbf{E} = \{e_k, k = 1, \dots, n_e\}$. Причем каждый объект a_k выполняет некоторый комплекс задач $\mathbf{P} = \{p_k, k = 1, \dots, n_p\}$. Задачи объектов p_k решаются с помощью выделенных классов задач (принятие решений, наблюдение, классификация, идентификация, навигация, управление, связь), которые выполняются в системе \mathcal{S} при изменении сред \mathbf{E} и отражают состояние системы. Состояние объектов $Ag = \{a_k, k = 1, \dots, n_a\}$ в момент времени t описывается вектором состояния $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{n_x}]^T$.

Сценарий R как объект исследования представляет собой сложную, иерархически построенную конструкцию. Опишем основные элементы сценария [53].

Общемодельные: $\mathbf{M} = (\mathbf{M}^A; \mathbf{M}^D; \mathbf{M}^E; \mathbf{M}^S; \mathbf{M}^{Kn}; \mathbf{M}^{Dm})$ (метанабор), где \mathbf{M}^A модели агентов, \mathbf{M}^D модели датчиков и измерений, \mathbf{M}^E модель окружения, \mathbf{M}^S модель поведения системы, \mathbf{M}^{Kn} модель базы знаний и данных, \mathbf{M}^{Dm} модели принятия решений.

Пространственно-информационные: шкала траекторий ZT , шкала событий RT , горизонт сценария $t_N = T \in ZT$ (т.е. момент времени осуществления последнего события сценария), условное решение $\zeta(t_i) = (\vartheta(t_i), \gamma(t_i))$ в момент времени $t_i \in ZT$, в том числе, управляемо-контролируемые факторы $\vartheta \in \mathbf{M}^A$, неконтролируемые факторы $\gamma \in \Gamma$, множество условных решений $S^{CS} = \mathbf{M}^A \times \Gamma$.

Для управления МАС используется совместное (согласованное) по принятию и реализации решений связанное управление группой объектов – групповое управление [53].

Модель \mathbf{M}^{GU} группового управления в системе \mathcal{S} может быть задана, следующими компонентами:

$$\mathbf{M}^{GU}(\mathcal{S}) = \{\mathcal{S}; \mathbf{A}; \mathbf{C}; \mathbf{A}g; \mathbf{D}; \mathbf{u}; \mathbf{p}; \xi; \Delta; \mathbf{M}^S; \mathbf{M}^A; \mathbf{M}^D; \mathbf{M}^{\text{эф}}\}, \text{ где}$$

\mathcal{S} – обозначение исследуемой системы;

\mathbf{A} – цели управления;

\mathbf{C} – стратегии управления;

$Ag = \{a_i, i = 1, \dots, n_a\}$ – агенты;
 $D = \{d_i, i = 1, \dots, n_d\}$ – измерители системы;
 $u = (u^{(i)}, i = 1, \dots, d)$ – управляющие воздействия;
 $r = (r^{(i)}, i = 1, \dots, h)$ – ресурсы управления;
 ξ – учитываемые виды (модели) неопределенности;
 $\Delta = [t_n, t_k]$ – горизонт управления;
 M^S – модель поведения системы S ;
 M^A – модели агентов;
 M^D – модели датчиков и измерений;
 $M^{\Phi} = \{f, \Delta_F\}$ – модель оценки эффективности управления,
 f – набор характеристик сценария R ,
 $\Delta_F = [t_0; t_e]$ – глубина оценки эффективности управления.

2.3 Комплексование информации

Решение задачи навигации основано на комплексовании информации от инерциальной навигационной системы, данных карты геофизических полей, маяков, акустических, спутниковых и радиолокационных средств [1, 2, 54]. На рисунке 3 представлена схема комплексования навигационной информации для выработки точного позиционирования АБА.

В дальнейшем для значительного упрощения записей индекс момента i времени t_i , номер или идентификатор объекта $\eta = 1, 2, \dots$ и индикатор $l = 1, 2, \dots$ ГФП опущены для рассматриваемых векторов и их составляющих. Координаты положения АБА, вырабатываемые бортовой навигационной системой автономного подвижного аппарата, передаются вектором $X^{HC} = [X_1^{HC} \ X_2^{HC} \ X_3^{HC}]^T$, который может быть представлен в виде:

$$X^{HC} = X + \Delta X^{HC}, \quad (1)$$

где $X = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$ – истинные координаты подвижных объектов и маяков; ΔX^{HC} – погрешности выработки координат места НС.

Спутниковая навигационная аппаратура потребителя по измерениям от ГНСС вычисляет местоположение объекта навигации в виде вектора $X^{HA} = [X_1^{HA} \ X_2^{HA} \ X_3^{HA}]^T$.

В процессе движения АБА вычисляются значения параметров ГФП по соответствующим картам $\varphi^K(\bullet)$, в точке пространства, определяемой координатами НС по формуле

$$Y^K = \varphi^K(X^{HC}) + \Delta Y^K, \quad (2)$$

где ΔY^K – ошибка картографирования.

Внешний датчик обеспечивает измерения некоторого геофизического поля (параметра) l , которые могут быть представлены в виде:

$$Y^D = \varphi^K(X) + \Delta Y^D, \quad (3)$$

где ΔY^D – погрешность измерений датчика.

Для комплексования могут использоваться измерения от точечных ориентиров – маяков, каждый из которых имеет эталонные координаты $X^M = [X_1^M \ X_2^M \ X_3^M]^T$ в соответствии с формулой:

$$Y^M = \varphi^K(X^{HC}) + \Delta Y^M, \quad (4)$$

где ΔY^M – погрешность измерений для маяка.

Задача заключается в том, чтобы, располагая набором измерений Y^C, Y^D, Y^M получить оценки погрешностей НС $\Delta \hat{X}^{HC}$, с использованием которых можно было бы уточнить показания НС.

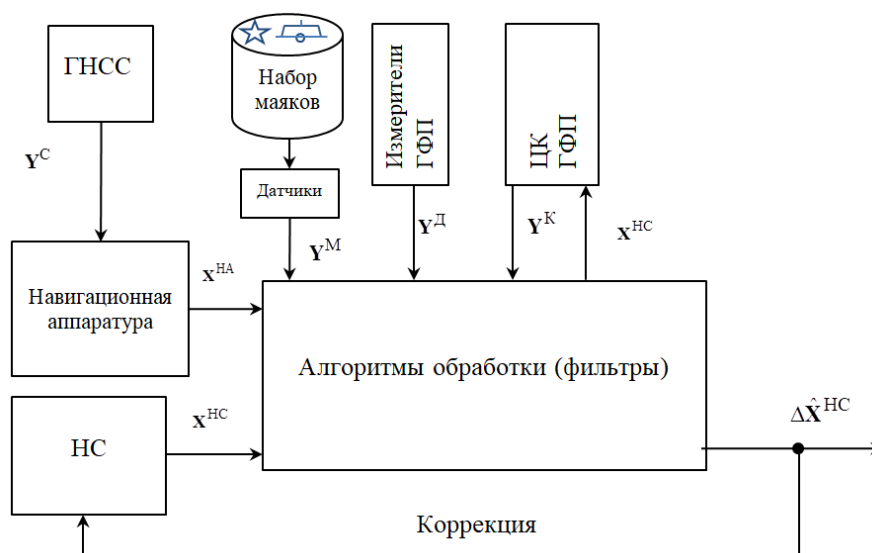


Рис. 3. Схема комплексирования навигационной информации

Заключение

Предложена на основе теории мультиагентных систем концепция совместной навигации и связи гетерогенной группы беспилотных аппаратов по данным геофизических полей и маяков в сочетании с другими средствами, в частности, с акустическими средствами для подводных аппаратов, информации от интеллектуальных маяков и данных от спутниковых, радиотехнических систем при использовании надежной безопасной системы связи между аппаратами.

Представлены схема взаимодействия гетерогенных автономных беспилотных аппаратов в трех средах и структурная схема концепции.

Предложена математическая модель мультиагентной системы для навигации и связи.

Дано формализованное описание сценария взаимодействия агентов для выполнения заданий.

Представлена модель группового управления.

Предложена схема комплексирования навигационной информации для точного определения местоположения автономных беспилотных аппаратов.

Литература

1. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. ЧАСТЬ 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация, 2015. – №3(90). – С. 102-125. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.102-125.
2. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. ЧАСТЬ 2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация, 2015. – № 4(91). – С. 147-159. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.4.147-159.
3. Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В., Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
4. Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 220 с.
5. Henley A.J. Terrain aided navigation - current status techniques for flat terrain and reference data requirements // IEEE PLAN'S-90, 1990. pp. 608-615.
6. Johnson N. Terrain Aided Navigation Using Maximum a Posteriori Estimation // PLAN'S-90, 1990. pp. 464-469.
7. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд. Томского университета, 2010. – 317 с.
8. Reed C.G. Range correlation guidance for cruise missiles // IEEE Trans. Aerospace and Electr. Sys. Vol. AES-15, № 4. 1979. pp. 547-555.
9. Hollowell J. HELI/SITAN. A Terrain Referenced Navigation Algorithm for Helicopters. // IEEE PLAN'S-90, 1990. pp. 616-625.
10. Snyder F.B. Terrain aided altitude computations on the AFTI/F-16 // PLAN'S-90, 1990. pp. 474-481.
11. French R.L. Land Vehicle Navigation and Tracking. Global Positioning System: Theory and Applications. 1996. Vol. II. pp. 275-301 (Edited by Parkinson B.W.)
12. Степанов О.А. Состояние перспективы развития и применения наземных систем навигации для подвижных объектов //Гироскопия и навигация, 2005. – №2. – С.95-121.

13. *Шолохов А.В.* Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении с использованием контрольных точек цифровой карты дороги // *Гироскопия и навигация*, 2007. – № 3. – С. 34-41.
14. *Davidson P., Collin J., Takala J.* Application of Particle Filters to a Map-Matching Algorithm // *Gyroscope and Navigation*. 2011, Vol. 3. pp. 46-58.
15. *Gustafsson F.* Navigation and tracking of road-bound vehicles using map support // In: A. Eskandarian ed. *Handbook of Intelligent Vehicles* London: Springer. 2012. pp. 397-434.
16. *Afzal M.H.* Use of Earth's Magnetic Field for Pedestrian Navigation: Dissertation. Canada: University of Calgary, 2011. P. 247.
17. *Davidson P.* Algorithm for Autonomous Personal Navigation Systems: Dissertation. Finland: Tampere University of Technology, 2013. P. 95.
18. *Gilleeron P.Y., Spassov I., Merminod B.* Indoor Navigation Enhanced by Map-Matching // *European Journal of Navigation*. 2005. Vol.3, N3. pp. 6-13.
19. *Ascher C.C., Kessler C., Wankel M., Trömmel G.G.* Dual IMU Indoor Navigation with particle filter based map-matching on a smartphone. // *Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. 2010.
20. *Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L.* A survey of underwater vehicle navigation: recent advances and New Challenges // *Proceedings of the 7th Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC'2006)*. 2006.
21. *Stutters L., Liu H., Tiltman C., Brown D.J.* Navigation technologies for autonomous underwater vehicles // *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 2008. 38 (4), pp. 581-589.
22. *Paull L., Saeedi S., Seto M., Li H.* AUV Navigation and Localization - A Review // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2014. 39(1). pp. 131-149.
23. *Miller A., Miller B., Miller G.* Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System // *Drones*, 2021. Vol. 5, Iss. 83, <https://doi.org/10.3390/drones5030083>.
24. *Min Jiang, Sanming Song, Yiping Li, Wenming Jin, Jian Liu & Xisheng Feng.* A Survey of Underwater Acoustic SLAM System, *International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2019)*, *Lecture Notes in Computer Science (LNAI)*, 2019. Vol. 11741, pp. 159–170.
25. *Tan H.P., Diamant R., Seah W.K., Waldmeyer M.* A survey of techniques and challenges in underwater localization. *Ocean Eng.* 2011, 38, 1663–1676.
26. *Wernli R.* The Present and Future Capabilities of Deep ROVs. *Mar. Technol. Soc. J.* 1999, 33, 26–40.
27. *Reis J., Morgado M., Batista P., Oliveira P., Silvestre C.* Design and Experimental Validation of a USBL Underwater Acoustic Positioning System. *Sensors*, 2016, 16, 1491.
28. *Kebkal, K.G.; Mashoshin, A.I.* AUV acoustic positioning methods. *Gyroscope Navig.* 2017, 8, pp. 80–89.
29. GPS Intelligent Buoys. *Ocean News & Technology*. 2003, Volume 9. URL: <https://www.proquest.com/docview/199921090/9789F734569D4A96PQ/>.
30. *Denny M.* *The Science of Navigation: From Dead Reckoning to GPS*; Johns Hopkins University Press: Baltimor, MD, USA, 2012.
31. *Tal A., Klein I., Katz R.* Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) Fusion with Partial DVL Measurements. *Sensors*, 2017, 17, 415.
32. *Whitcomb L., Yoerger D., Singh H.* Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, Detroit, MI, USA, 10–15 May 1999; Volume 1, pp. 399–406.
33. *Paull L., Saeedi S., Seto M., Li H.* AUV Navigation and Localization: A Review. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2014, 39, pp. 131–149.
34. *Ai L.L., Xu W.H., Liu Y.C., Gu J.L.* Underwater GPS Positioning System Based on a Dual Acoustic Device. In *Applied Mechanics and Materials; Applied Scientific Research and Engineering Developments for Industry*; Trans Tech Publications Ltd.: Bäch, Switzerland, 2013; Volume 385, pp. 1255–1259.
35. *Powell S.B., Garnett R., Marshall J., Rizk C., Gruiev V.* Bioinspired polarization vision enables underwater geolocalization. *Sci. Adv.* 2018, 4, DOI: 10.1126/sciadv.aao6841.
36. *Miller A., Miller B., Miller G.* On AUV Control with the Aid of Position Estimation Algorithms Based on Acoustic Seabed Sensing and DOA Measurements. *Sensors*, 2019, 19, 5520.
37. *Borisov A., Bosov A., Miller B., Miller G.* Passive Underwater Target Tracking: Conditionally Minimax Nonlinear Filtering with Bearing-Doppler Observations. *Sensors*, 2020, 20, 2257.
38. *Ziyuan Li, Huapeng Yu, Tongsheng Shen, Zhihui Li.* Segmented Matching Method of Multi-Geophysics Field SLAM Data Based on LSTM, 2020 3rd IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), DOI:10.1109/ICUS50048.2020.9274964.
39. *Berdyshev V.I., Kiselev L.V., Kostousov V.B.* Mapping Problems of Geophysical Fields in Ocean and Extremum Problems of Underwater Objects Navigation, *IFAC PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, Iss. 32, pp. 189–194, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.379>.
40. *Jung J., Park J., Choi J., Choi H.-T.* Navigation of Unmanned Surface Vehicles Using Underwater Geophysical Sensing, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 208707- 208717.
41. *Lee T., Mckeever S., Courtney J.* Flying Free: A Research Overview of Deep Learning in Drone Navigation Autonomy // *DRONES*, Vol. 5, Iss. 2, №52, DOI:10.3390/drones5020052, JUN 2021.
42. *Shiri H., Park J., Bennis M.* Remote UAV Online Path Planning via Neural Network-Based Opportunistic Control. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 2020, 9, 861–865.

43. *Anwar A., Raychowdhury A.* Autonomous Navigation via Deep Reinforcement Learning for Resource Constraint Edge Nodes Using Transfer Learning. *IEEE Access*, 2020, 8, 26549–26560.
44. *Kupervasser O., Kutomanov H., Levi O., Pukshansky V., Yavich R.* Using Deep Learning for Visual Navigation of Drone with Respect to 3D Ground Objects // *MATHEMATICS*, DEC 2020. Vol. 8, Iss. 12, № 2140, DOI: 10.3390/math8122140.
45. *Chame, H.F., dos Santos M.M., Botelho S.S.D.* Neural network for black-box fusion of underwater robot localization under unmodeled noise // *ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS*, DEC 2018. Vol. 110, pp. 57-72, DOI: 10.1016/j.robot.2018.08.013.
46. *Ali U., Muhammad W., Irshad M.J. and Manzoor S.* Multi-sensor fusion for underwater robot self-localization using PC/BC-DIM neural network, *Sensor Review*, 2021, Vol. 41 No. 5, pp. 449-457. <https://doi.org/10.1108/SR-03-2021-0104>.
47. *Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Алгоритмы функционирования мультиагентной системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом // *Материалы конференции «Информационные технологии в управлении»*, 2020 г. – С. 216-220.
48. *Aparicio J., Jiménez A., Álvarez F.J., Ruiz D., De Marziani C., Ureña J.* Characterization of an Underwater Positioning System Based on GPS Surface Nodes and Encoded Acoustic Signals. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2016, 65, 1773–1784.
49. *Webster S.E., Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L.* Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles. *Int. J. Robot. Res.* 2012, 31, 935–950.
50. *Eustice R.M., Singh H., Whitcomb L.L.* Synchronous-clock, one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles. *J. Field Robot.* 2011, 28, pp. 121–136.
51. *Машошин А.И., Скобелев П.О.* Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2016. – № 1 (174). – С. 45-59.
52. *Боев В.Д.* Имитационное моделирование систем: учебное пособие для вузов / В.Д. Боев. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 253 с.
53. *Кульба В.В., Кононов Д.А., Чернов И.В., Роцин П.Е., Шулигина О.А.* Сценарное исследование сложных систем: анализ методов группового управления // *Управление большими системами: сборник трудов*, 2010. – № 30-1. – С. 154-186.
54. *Stepanov O.A., Amosov O.S., Toropov A.B.* Comparison of Kalman-type Algorithms in Nonlinear Navigation Problems for Autonomous Vehicles // *Proceedings of the 6th IFAC Symposium Autonomous Vehicles*, Toulouse, France, September 3-5, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Vol. 6, Iss. PART 1, 2007, P. 493-498, DOI: 10.3182/20070903-3-fr-2921.00084