

УДК 551.46.077:629.584

**А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко\*****НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ**

*Рассматривается опыт создания и практического применения интегрированных систем навигации и управления автономного подводного робота, осуществляющего заданные программные миссии в сложных и экстремальных условиях среды. Приводятся данные морских натурных испытаний навигационного комплекса в составе подводного робота «Клавесин» и результаты его опытной эксплуатации при работе подо льдом в высоких широтах Арктики при обследовании хребта Ломоносова.*

*Подводные роботы; навигационный комплекс; бортовые автономные и гидроакустические системы; подледные исследования; Арктика.*

**A.V. Inzarcev, L.V. Kisilev, Yu. V. Matvienko****AUTONOMOUS UNDERWATER ROBOT NAVIGATION AND CONTROL**

*The work examines the experience in developing and applying the integrated positioning and control systems of the autonomous underwater robot performing the preset program missions in a severe and extreme environment. The paper also outlines the data from the full-scale sea tests of the navigation system as part of the underwater robot "Klavesin" and results of its trial performance during under-ice operations of the Lomonosov range survey in the high latitudes of the Arctic.*

*Underwater robots; navigation system; onboard autonomous and acoustic systems; under-ice research; the Arctic.*

В настоящее время для проведения глубоководных работ и океанографических исследований создаются и используются разнообразные робототехнические средства, включая автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), эффективные в особенности при работе на больших глубинах, подо льдом, в других экстремальных условиях подводной среды. В ряде стран создано значительное число аппаратов данного типа, предназначенных для поиска объектов, съемки рельефа дна, геолого-разведки, научных исследований и решения широкого круга военных задач.

Разработка средств навигационного обеспечения была и остается одной из приоритетных в общей структуре работ, выполняемых при создании подводных роботов. Как правило, в составе современных подводных аппаратов используются навигационные комплексы, включающие бортовые автономные, гидроакустические и спутниковые системы навигации [1-3]. В Институте проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН имеется многолетний опыт создания и использования АНПА для решения практических задач на глубинах до 6 000 м [3-5]. Одновременно это и опыт разработки и эксплуатации различных навигационных средств. Созданные за прошедшие годы навигационные средства имели различную дальность действия, различную точность, существенно отличались подходами к построению систем, но в целом были направлены на решение задач, обеспечивающих надежную и достоверную навигационную поддержку АНПА различного назначения.

По опыту всех предшествующих работ перечень этих задач включает:

- ◆ определение и отображение на борту обеспечивающего судна текущего местоположения АНПА в условиях мелкого и глубокого моря,

---

\* Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПМТ ДВО РАН – участникам разработки и испытаний навигационного комплекса АНПА, а также коллегам из организаций, участвовавшим в создании и проведении комплексных испытаний отдельных систем в составе АНПА «Клавесин».

- ◆ безопасное выполнение рабочих миссий вблизи дна и донных препятствий,
- ◆ управление ходом миссии с борта судна,
- ◆ получение на борту судна информации о состоянии систем АНПА.
- ◆ определение текущих координат АНПА на его борту,
- ◆ повышение оперативности и расширение районов работ навигационной системы за счет отсутствия стационарно установленных средств (маяков),
- ◆ высокоскоростной обмен информацией между АНПА и судном по гидроакустическому каналу связи,
- ◆ приведение аппарата в зону действия гидроакустических средств и обеспечение связи для управления в ближней зоне.

В навигационном оснащении современных аппаратов, создаваемых в ИПМТ ДВО РАН, используются элементы бортовой автономной, гидроакустической и спутниковой систем навигации [5-7]. Каждая из систем, в свою очередь, представляет собой комплекс устройств, входящих в общий базовый состав систем АНПА и судового оборудования (рис. 1).

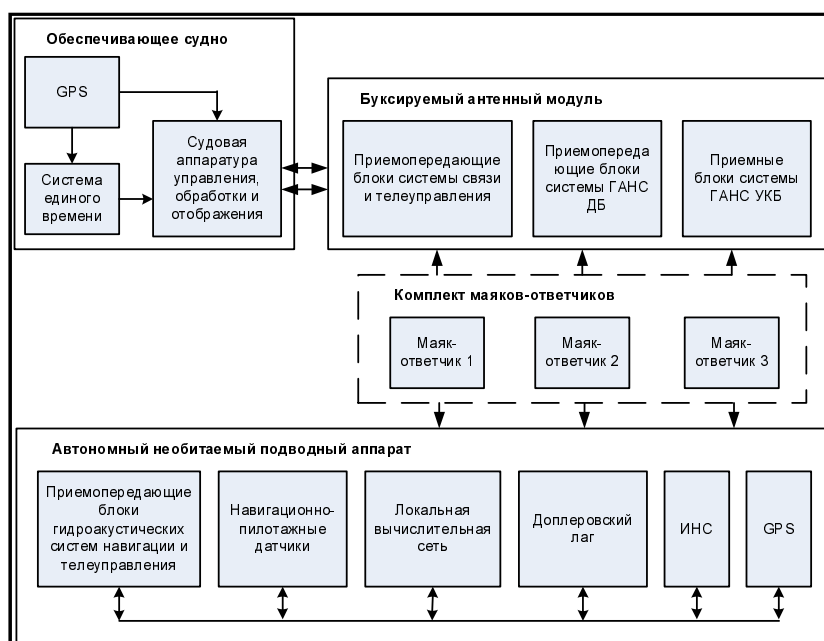


Рис. 1. Навигационные средства АНПА

Навигационным оборудованием в различных условиях работ решаются две задачи. Первая заключается в достижении максимальной точности навигационной привязки, характерной для поисковых работ и детального обследования выделенных районов. Вторая состоит в контроле текущего положения АПР, например, при выполнении перехода в район работ или проведения обзорных гидролокационных съемок.

Для достижения максимальной точности безальтернативными являются дальномерные ГАНС. При учете основных факторов, определяющих скорость распространения гидроакустических сигналов в районе работ, оценка относительной погрешности измерения дальности может быть не более  $10^{-3}$ . При наличии сети опорных маяков-ответчиков реализуется схема ГАНС ДБ, причем основной ресурс в части увеличения точности – увеличение числа одновременно наблюдае-

мых маяков. Очевидно, что применение ГАНС ДБ ограничивает район работ аппарата зоной действия маяков и требует много времени на установку, координирование и съем маяков. При отсутствии установленных маяков судовая навигационная антенна обычно используется для работы в режиме ГАНС УКБ и обеспечивает контроль местоположения АПР. В этом случае положение источника навигационных сигналов, установленного на борту объекта навигации, определяется путем измерений его дальности и углового положения с борта ОС при использовании в составе антенны специального многоэлементного приемника для фазовой обработки. В этом режиме определяются координаты объекта на борту носителя, но этого недостаточно для сопровождения миссии АНПА. Во-первых, получаемые координатные данные недоступны на борту самого АПР, во-вторых, отсутствует возможность управления аппаратом с борта судна, в-третьих, из-за меньшей, чем в ГАНС ДБ, навигационной точности. Поэтому судовая антенна в названном режиме наряду с определением текущего положения объекта должна поддерживать с ним информационный обмен.

Если информационный обмен между АНПА и судовой антенной обеспечен применением сложных навигационных сигналов, в структуре которых передается навигационная информация, то возможности комплекса расширяются за счет [5]:

- ◆ дополнительного канала измерения дальности и увеличения достоверности навигационных данных,
- ◆ уменьшения числа или полного исключения маяков при выполнении миссии АНПА,
- ◆ повышения точности координатной оценки, получаемой при работе углового пеленгатора,
- ◆ улучшением результатов траекторной обработки дальномерной информации за счет фильтрации данных о текущей скорости, курсе и координатах ПА, переданных на борт ОС по информационному каналу.

Аппаратура ГАНС ДБ содержит комплекты маяков, приемопередающей аппаратуры АНПА и судна. В целом комплекс обеспечивает навигацию, телеуправление, телеметрию и контроль хода поисковой операции путем анализа передаваемых с борта АНПА телевизионных кадров или гидролокационных изображений. Гидроакустический комплекс и его модификации, в котором кроме навигационной системы были реализованы системы телеметрии и телеуправления, успешно обеспечивал проведение реальных морских операций АНПА в течение трех последних десятилетий.

Бортовая автономная навигационная система (БАНС) представляет собой распределенный модуль, который образуют система счисления пути, ИНС и приемник GPS, работающие под управлением локальной вычислительной сети. Автономные навигационные средства в таком составе способны обеспечить осуществление жестких и корректируемых программных миссий и накопление информации о состоянии аппарата в процессе движения. Решение задач, связанных с обследованием объектов и работой аппарата в условиях повышенной автономности, приводит к необходимости разработки навигационного комплекса, позволяющего производить автономную коррекцию движения по текущим координатам аппарата и заданным координатам целей или ориентиров.

При длительной автономной работе аппарата важно обеспечить определение координат с максимально достижимой точностью, используя интегрированную БАНС. В общем случае навигационная ошибка при определении координат аппарата путем счисления пути зависит от целого ряда факторов: инструментальных ошибок датчиков, в частности, уходов гироскопов, ошибки ввода начальных данных, ошибки измерения скорости, в особенности, при неучтенном течении, ошиб-

ки начальной выставки ИНС. Очевидно, что суммарная навигационная погрешность при отсутствии коррекции от внешних измерителей накапливается во времени и при длительной работе аппарата становится недопустимо большой. При работе аппарата в мелководном районе ошибка может быть устранена благодаря возможности проводить коррекцию с помощью GPS при эпизодическом всплытии аппарата на поверхность.

В настоящее время наибольший практический интерес представляют следующие варианты комплексирования и коррекции навигационной информации на борту АНПА:

- ◆ коррекция ИНС (в полной конфигурации или в режиме гиросkompаса) от ДЛ (вблизи дна) и GPS (на поверхности моря);
- ◆ взаимная коррекция гироскопического и магнитного компасов в различных режимах работы АНПА;
- ◆ интегральная обработка информации БАНС и бортового приемника ГАНС-ДБ (УКБ);
- ◆ коррекция БАНС по гидроакустическому каналу связи и телеуправления с использованием данных ГАНС и GPS.

Отметим некоторые особенности навигации и управления, рассматривая в качестве примера АНПА «Клавесин».

Бортовой навигационный комплекс АНПА выполнен в двух конфигурациях, отличающихся типом используемой ИНС. В одной из конфигураций в качестве ИНС используется оптоволоконный гиросkompас, в другой – механическая ИНС на базе динамически настраиваемых гироскопов. В данной системе программным путем обеспечивается коррекция скорости с использованием измерений, поступающих от акустического доплеровского лага. Для совместной обработки данных от внутренних источников (гироскопов, акселерометров) и внешних источников (ДЛ, приемника GPS) используется фильтр Калмана.

При работе аппарата в ограниченном районе или в режиме сопровождения обеспечивающего судна коррекцию автономных координат можно осуществлять путем совместной обработки информации БАНС и ГАНС или путем передачи по гидроакустическому каналу связи навигационных данных на аппарат наряду с данными телеметрии и командами телеуправления. Приведенные варианты комплексирования систем проверялись при многократных натурных испытаниях в условиях мелкого и глубокого моря, а также в условиях высоких широт Арктики при обследовании континентального шельфа в районе хребта Ломоносова [5]. Экспедиция базировалась на атомном ледоколе «Россия», и за короткий срок были выполнены исследования геологических характеристик дна на площади более 50 кв. км на глубинах 1 400-1 600 м.

В ходе экспедиции подводным аппаратом были выполнены следующие работы:

- ◆ батиметрическая съемка участка дна площадью 50 кв. км,
- ◆ гидролокационная съемка поверхности морского дна,
- ◆ акустическое профилирование грунта,
- ◆ маршрутная фотосъемка отдельных участков дна,
- ◆ измерения температуры и электропроводности воды.

Для работы в открытой воде и в условиях умеренных широт АНПА «Клавесин» оснащен гидроакустическими средствами навигации и управления, применение которых на Севере в штатных режимах ограничивалось рядом обстоятельств.

Работа ГАНС УКБ в штатном составе оснащена магнитным датчиком курса, который в полярных широтах дает большую погрешность. Постановка в районе работ донных гидроакустических маяков-ответчиков, возвращаемых или разовых, и развертывание ГАНС ДБ в штатном режиме неэффективны из-за дрейфа ледово-

го поля. При значительном удалении приводящей акустической антенны, дрейфующей вместе с судном, резко ухудшаются условия гидроакустического контроля и управления работой с борта носителя. Постановка поверхностных маяков ГАНС ДБ также имеет свои недостатки. Все перечисленные факторы были учтены при организации навигационного сопровождения АНПА. По контуру полыньи, выбранной для пуска и всплытия АНПА, устанавливались три маяка-ответчика ГАНС ДБ с максимально возможными дистанциями между ними. Координаты маяков определялись в момент их постановки и непосредственно перед стартом АНПА, а затем вводились в навигационную программу в качестве постоянных данных. Положения маяков периодически уточнялись, и обновленные данные вводились в навигационную программу. Текущее положение судна и соответственно выставляемой судовой антенны определялись штатным приемником спутниковой навигации. С учетом получаемых данных определялся текущий дрейф ледового поля, и оценивалось положение измерительной базы маяков.

Фиксировались координаты стартовой точки АНПА на поверхности. Далее по данным ГАНС ДБ определялись координаты точки старта миссии АНПА у дна и соответственно точки начала координат работы бортовой навигационной системы. При выполнении миссии текущая траектория движения АНПА считалась по данным бортовых датчиков абсолютной скорости, курса, глубины, крена, дифферента.

По данным телеметрии, передаваемой с борта АНПА по гидроакустическому каналу связи, выполнялось счисление траектории движения АНПА в реальном времени на борту обеспечивающего судна. На навигационном планшете параллельно отображались траектория дрейфа судна с базой маяков и траектория движения АНПА относительно дрейфующей базы маяков. Накапливаемая ошибка системы счисления корректировалась по ряду дискретных точек, в которых расчет местоположения АНПА производился по данным ГАНС ДБ с использованием уточненных координат маяков (рис. 2).

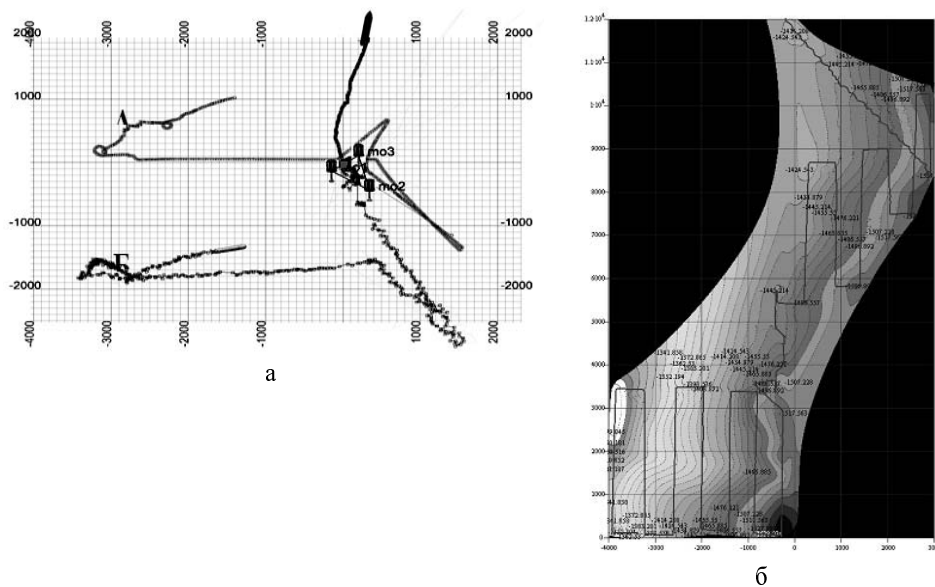


Рис. 2. Расчет местоположения АНПА по данным ГАНС ДБ: а – отображение траектории на навигационном планшете (слева); А – относительно дна по данным БАНС; Б – относительно дрейфующей базы; б – траектория с восстановленной батиметрической картой при 22-х часовом пуске аппарата (справа)

После завершения миссии АНПА выполнял процедуру автоматического выхода на судовой гидроакустический антенный модуль. На заключительной фазе приведения перед всплытием положение АНПА в полынье контролировалось по данным о дальностях аппарата от антенного модуля и каждого маяка. Команды на завершающие процедуры всплытия (подъем с глубины 20 м, а затем с глубины 5 м) подавались при получении минимальной дальности до судовой антенны (не более 20-25 м) и нахождении АНПА в центре полыньи (определяемом по дальностям АНПА от маяков).

При 22-часовом запуске суммарная ошибка БАНС, определенная как расхождение численных координат точки всплытия и координат, полученных при обсервации GPS, составила 1370 м или около 60 м/ч. Следует отметить, что в принятой структуре навигационного обеспечения заложены дополнительные возможности для коррекции численных координат и значительного уменьшения навигационной ошибки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Romeo J., Lester G.* Navigation is Key to AUV Missions // *Sea Technology*. 2001. – Vo.42. – № 12. – P. 24-29.
2. [www.cc.technol.com/auv.php?id=6](http://www.cc.technol.com/auv.php?id=6), [www.ise.bc.ca/theseus.html](http://www.ise.bc.ca/theseus.html), [www.maridan.dk](http://www.maridan.dk).
3. *Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.* Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука. – 2005. – 398 с.
4. *Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В.* Навигация и управление в подводном пространстве // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2004. – № 5. – С. 23-28.
5. *Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // *Подводные исследования и робототехника*. – 2007. – № 2. – С. 5-14.

**Инзарцев Александр Вячеславович**

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.  
E-mail: [inzar@marine.febras.ru](mailto:inzar@marine.febras.ru).  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а.  
Тел.: 84232432416.

**Киселев Лев Владимирович**

E-mail: [kiselev@marine.febras.ru](mailto:kiselev@marine.febras.ru).  
Тел.: 84232432674.

**Матвиенко Юрий Викторович**

E-mail: [ymat@marine.febras.ru](mailto:yamat@marine.febras.ru).  
Тел.: 84232432638.

**Inzarzev Alexandr Vyacheslavovich**

Institute of Marine Technology Problems.  
E-mail: [inzar@marine.febras.ru](mailto:inzar@marine.febras.ru).  
5a, Suhanova street, Vladivostok, 690950, Russia.  
Phone: 84232432416.

**Kiselev Lev Vladimirovich**

E-mail: [kiselev@marine.febras.ru](mailto:kiselev@marine.febras.ru).  
Phone: 84232432674.

**Matvienko Yuriy Viktorovich**

E-mail: [ymat@marine.febras.ru](mailto:yamat@marine.febras.ru).  
Phone: 84232432638.