

НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Ю.В.Ваулин, А.В. Инзарцев, А.В. Каморный,
Л.В.Киселев, Ю.В. Матвиенко, Н.И.Рылов, Р.Н. Рылов

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток

Рассматривается опыт создания и практического применения интегральной навигационной системы автономного подводного робота, осуществляющего заданные программные миссии в сложных и экстремальных условиях среды. Обсуждаются состав, характеристики и способы коррекции навигационных данных, полученных с помощью бортовой автономной, гидроакустической и спутниковой систем. 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

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, геологоразведки, научных исследований и решения широкого круга военных задач. Институт проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН имеет многолетний опыт создания и использования АНПА для решения практических задач на глубинах до 6000м [1]. Одновременно это и опыт разработки и эксплуатации различных навигационных средств [2]. В навигационном оснащении современных аппаратов, создаваемых в ИПМТ ДВО РАН, используются элементы бортовой автономной, гидроакустической и спутниковой систем навигации (рис 1).

Гидроакустический комплекс навигации и связи включает в себя систему с длинной базой (ГАНС-ДБ), систему с ультракороткой базой (ГАНС-УКБ), систему связи (ГАСС), работающую в режимах телеуправления и telemetry, системы дальнего и ближнего приведения. В состав всего комплекса входят приемопередающие устройства на аппарате, буксируемый гидроакустический модуль со всем необходимым комплексом антенн и навигационных датчиков, выставляемый с бор-

та обеспечивающего судна, комплект донных приемоответчиков ГАНС-ДБ. Географическая привязка всего пространственно распределенного комплекса обеспечивается с помощью приемников спутниковой навигации, а для экстренной связи и телеуправления, когда аппарат находится на поверхности воды, используются радиомодемы.

В состав бортовой автономной навигационной системы (БАНС) входят инерциальная навигационная система (ИНС), эхолокационная система (ЭЛС), приемник GPS, навигационно-пилотажные датчики (глубиномер, магнитный и гироскопический компасы, датчики крена и дифферента, измерители относительной и абсолютной скорости – вертушечный и доплеровский лаги (ВЛ, ДЛ), датчики угловых скоростей). В зависимости от конфигурации БАНС доставляемая измерителями информация используется для повышения надежности и точности работы системы. Собственно 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 программных миссий и накопление информации о состоянии аппарата в процессе движения.

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

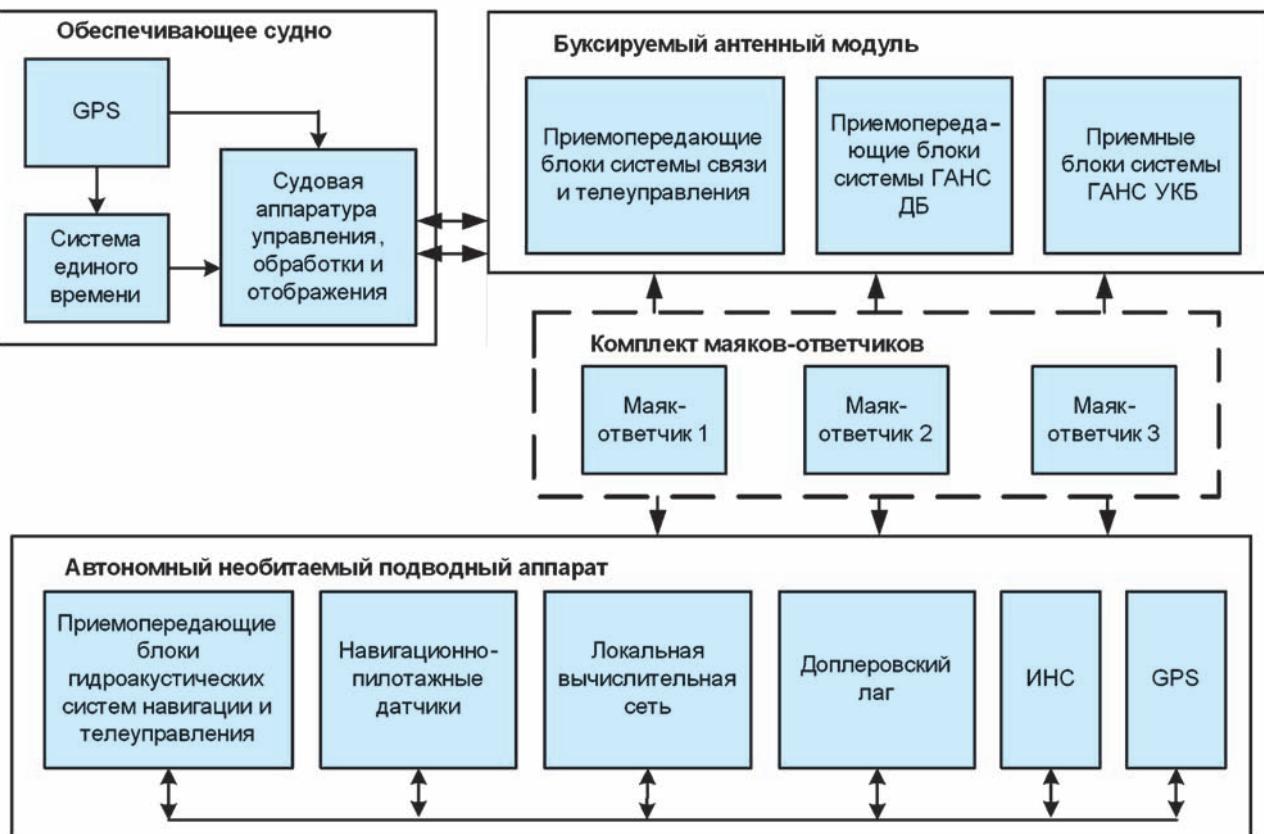


Рис. 1. Структура навигационного комплекса АНПА

- коррекция ИНС (в полной конфигурации или в режиме гирокомпаса) от ДЛ (вблизи дна) и GPS (на поверхности моря);
- взаимная коррекция гирокомпостого 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 телеконтроля с использованием данных ГАНС и GPS.

Отметим некоторые особенности навигационных вычислений, рассматривая в качестве примера интегральную систему навигации АНПА «Клавесин».

Как уже упоминалось, определение координат (как локальных, так и абсолютных) в автономной системе производится методом счисления пути. Для этого используются данные измерения вектора скорости, полученные с помощью относительного или абсолютного лага. Составляющие вектора скорости $V = (V_x, V_y)$ относительно выбранной неподвижной системы координат в этих случаях имеют вид:

$$V_x = V^{\text{отн}} \cos\psi \cos\varphi, \quad V_y = V^{\text{отн}} \cos\psi \sin\varphi, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_x &= V_x^{\text{абс}} \cos\varphi + V_y^{\text{абс}} \sin\varphi, \\ V_y &= V_x^{\text{абс}} \sin\varphi + V_y^{\text{абс}} \cos\varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $V^{\text{отн}}$ – скорость относительно потока, $V_x^{\text{абс}}, V_y^{\text{абс}}$ – осредненные значения продольной и поперечной составляющих скорости, измеряемые доплеровским лагом, ψ, φ – дифферент и курс, изменяющиеся с помощью ИНС.

Бортовой навигационный комплекс АНПА «Клавесин» выполнен в двух конфигурациях, отличающихся типом используемой ИНС. В одной из конфигураций в качестве ИНС используется оптоволоконный гирокомпас «Octans III» французской фирмы iXSEA, в другой – механическая ИНС на базе динамически настраиваемых гироскопов разработки ОАО «НПО Электромеханики» (г. Миасс). 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.

Задача БАНС сводится к измерению курса и скорости, вычислению по этим данным проекций скорости на координатные оси и их интегрированию для определения координат. Если используется относительный лаг, то при вычислении учитываются имеющиеся данные о течении (V_{Tx} , V_{Ty}). Функционирование системы может быть описано соотношениями:

$$X_c = X(t_0) + \int_{t_0}^t (V \sin \varphi + V_{Tx}) d\tau,$$

$$Y_c = Y(t_0) + \int_{t_0}^t (V \cos \varphi + V_{Ty}) d\tau, \quad (3)$$

где X_c , Y_c – координаты, счисленные с помощью БАНС, $X(t_0)$, $Y(t_0)$ - начальные координаты, вводимые перед пуском.

Оценки дальностей r_i ($i = 1 \dots n$) от аппарата до приемоответчиков с координатами (X_i, Y_i) и оценки координат аппарата (X_r, Y_r) , которые могут быть получены с помощью ГАНС, связаны уравнениями:

$$(X_r - X_i)^2 + (Y_r - Y_i)^2 = r_i^2, i=1 \dots n. \quad (4)$$

Оценки координат аппарата (X_c, Y_c) , определенные автономной системой, и оценки координат (X_r, Y_r) , полученные ГАНС, используются

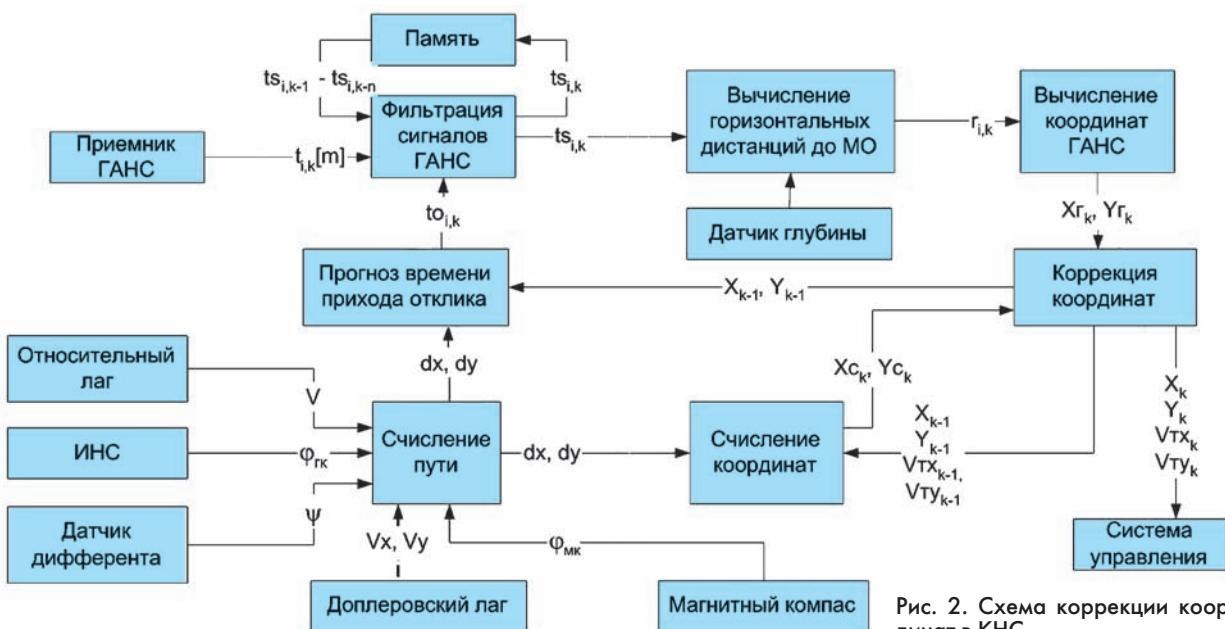
комплексированной навигационной системой (КНС) для улучшения результирующих оценок координат (X , Y). Коррекция координат в КНС осуществляется циклически с интервалом обновления данных, равным периоду гидроакустических посылок (откликов).

На рис. 2 представлена структурно-функциональная схема комплексированной системы, реализованной в виде вычислительной модели. Алгоритм КНС содержит следующие программные блоки:

- счисление координат на основе данных от навигационно-пилотажных датчиков;
- селектирование откликов от гидроакустических приемоответчиков;
- вычисление «гидроакустических» координат на основе дальномерной информации;
- коррекция координат и оценка скорости течения.

Входными параметрами системы являются курс от гирокомпаса или магнитного компаса, дифферент, относительная или абсолютная скорость, предварительная оценка составляющих скорости течения (при использовании относительного лага). Выходными параметрами являются пройденный за цикл путь (dx , dy) и координаты X_c , Y_c .

Процесс предварительной обработки сигналов от приемоответчиков ГАНС обеспечивает фильтрацию (селектирование) ложных сигналов, вызванных многолучевостью, и формирование дистанций r_{ik} для последующей процедуры вычисления координат X_r, Y_r . Обработка сигналов производится с учетом предыстории, т.е. накопленной за предыдущие циклы дальномерной



информации. Преимущество алгоритма обработки сигналов на борту АНПА по сравнению с аналогичной процедурой на борту обеспечивающего судна заключается в том, что на АНПА используется информация о текущих счисленных координатах аппарата, на основе которой вычисляются ожидаемые времена откликов t_{ik} , где k – это номер шага, $i = 1..3$ – номер приемоответчика. На основе измеренных дистанций r_{ik} вычисляются координаты X_r , Y_r .

Для коррекции координат формируется итерационный цикл:

$$\begin{aligned} X_k &= X_k + K_1 (X_{C_k} - X_{G_k}), \quad Y_k = Y_{C_k} + K_1 (Y_{C_k} - Y_{G_k}), \\ V_{Tx_k} &= V_{Tx_k} + K_2 (X_{C_k} - X_{G_k})/dt, \\ V_{Ty_k} &= V_{Ty_k} + K_2 (Y_{C_k} - Y_{G_k})/dt, \quad (5) \\ X_k &\rightarrow X_{C_k}, \quad Y_k \rightarrow Y_{C_k}, \end{aligned}$$

где dt – период работы ГАНС, K_1 , K_2 – параметры коррекции.

Оценки составляющих скорости течения V_{Tx_k} , V_{Ty_k} используются при вычислении координат X_c , Y_c в периоды между циклами коррекции.

Приведенные варианты комплексирования и оценки точности систем проверялись при многократных натурных испытаниях в условиях мелкого и глубокого моря. Ниже приведены некоторые результаты опытной проверки навигационных характеристик при работе АНПА в различных условиях.

■ ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРИ РАБОТЕ АНПА В МЕЛКОМ МОРЕ

Испытания навигационного комплекса проводились в составе АНПА «МТ-98» при траекторных измерениях в условиях полигона в одной из бухт залива Петра Великого. На рис.3,а показана траектория движения АНПА во время 12-часового пуска. В течение всего пуска АНПА выполнял обзорную гидролокационную съемку заданного района и по завершении программы всплыл и произвел GPS обсервацию. Рассогласование координат, счисленных по данным индукционного (магнитного) компаса ИД-6, доплеровского лага и скорректированных по отсчетам ГАНС-ДБ, с координатами, полученными от GPS в точке всплытия, составило 35 м. Для сравнения на рис. 4,а показана траектория, счисленная БАНС без комплексирования (без учета данных измерений ГАНС). В этом случае ошибка счисления составила бы 1600 м, или 3,6 % от пройденного пути.

Из сравнения результатов многократно проведенных экспериментов было показано, что

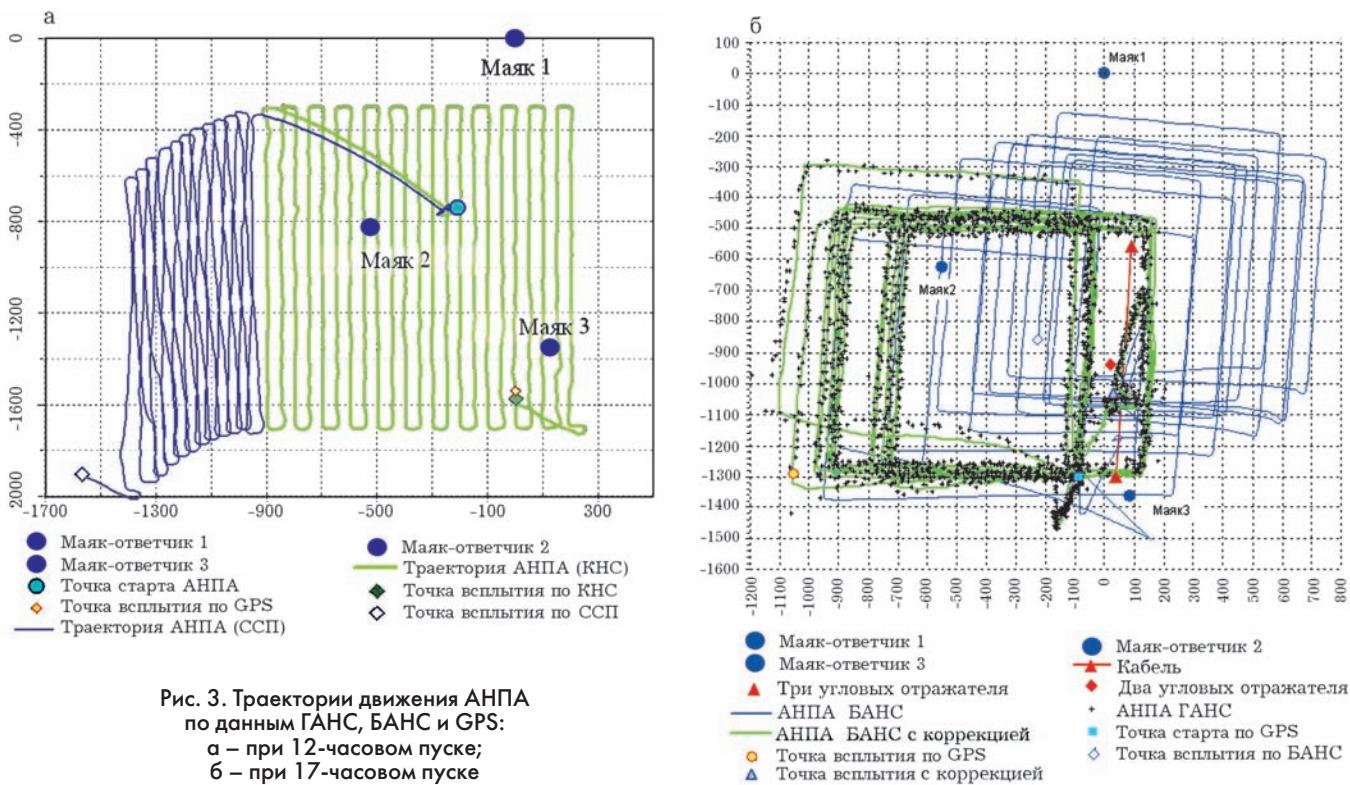
средняя скорость накопления ошибки определения координат БАНС минимальна при комплексировании ИНС (в режиме гирокомпаса) и доплеровского лага. В экспериментах использовалась механическая полуаналитическая ИНС на основе трехосного гиростабилизатора разработки ОАО «НПО Электромеханики». При этом относительная ошибка, осредненная по нескольким пускам аппарата, составила 28,5 м/ч, что для всего пройденного маршрута соответствует ошибке счисления координат около 1%.

Дальнейшее совершенствование системы было связано с увеличением времени автономной работы АНПА. На рис. 3,б приведены траектории движения АНПА, полученные при 17-часовом пуске аппарата с определением его координат средствами ГАНС, БАНС и GPS. Программная траектория задавалась в виде многократно повторяющихся квадратов в зоне действия трех маяков-приемоответчиков ГАНС. Представленные на рис. 3,б различные типы траекторий движения АНПА соответствуют следующим условиям эксперимента.

Процедура счисления координат с помощью БАНС выполнялась по данным гирокомпаса и вертушечного лага. Одновременно производилась коррекция счисленных координат БАНС по дальномерной информации ГАНС-ДБ. Для сравнения полученных результатов и определения накапливающейся ошибки БАНС использовались данные измерений ГАНС-ДБ и GPS (при всплытии на поверхность). При этом предполагалось, что собственная «точечная» ошибка ГАНС-ДБ относительно истинного положения объекта и аналогичная ошибка обсерваций по GPS не превосходят 10-15 м, что позволяет принимать эти системы в качестве «эталона». При этих условиях накопившаяся по завершении программы ошибка счисления БАНС (без коррекции от ГАНС) относительно координат точки всплытия по GPS составила 933 м, что соответствует скорости накопления ошибки 54 м/ч. Комплексирование БАНС и ГАНС-ДБ позволяет свести ошибку счисления БАНС до соответствующего уровня ГАНС-ДБ (15 м).

■ ОСОБЕННОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ШИРОТ И СПЛОШНОГО ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ РАЙОНА РАБОТ

Представленный навигационный комплекс эффективно использовался в различных поисково-обследовательских работах в течение ряда лет. Новый опыт практического применения его связан с проведением летом 2007 г.



научных исследований в Арктике на хребте Ломоносова, что вызвано растущим интересом к минеральным ресурсам в недрах морского дна [3]. Изучение дна Северного Ледовитого океана до настоящего времени осуществлялось путем точечного зондирования с борта ледоколов или с дрейфующих полярных станций. Для изучения батиметрических, физических и геоморфологических характеристик дна Северного Ледовитого океана в условиях сплошного ледового покрытия на большой площади наиболее эффективным является применение подводных робототехнических средств, действующих с борта ледоколов или с ледовых баз.

Работы в высокочиротной Арктике произошли с помощью АНПА «Клавесин» с базированием на атомном ледоколе «Россия». Экспедиция работала на хребте Ломоносова при состоянии ледового покрытия примерно 9,5 балла (сплошной лед с отдельными редкими полыньями размером до 100 м) и при скорости дрейфа ледового поля до 0,5 узла. Были выполнены исследования геологических характеристик дна на площади более 50 км² на глубинах 1400–1600 м. АНПА «Клавесин» представляет собой многофункциональный комплекс, оснащенный развитыми средствами автономной и гидроакустической навигации и связи, реконфигурируемой системой управления, которая позволяет выполнять обзорно-поисковые и обследовательские работы автономно или с применением средств гидроакустического телевидения. Аппарат предназна-

чен для работы в открытом море на глубинах до 6000 м, поэтому для работы в условиях полярных широт и сплошного ледового покрытия потребовались серьезные изменения в организации его средств управления, навигации и связи. Эти изменения были продиктованы экстремальными условиями работы, к которым можно отнести:

- проведение спуско-подъемных операций АНПА через полынью, размеры которой соизмеримы с размерами ледокола-носителя;
- дрейф льда в районе работ;
- зависимость точности показаний магнитных и гироскопических датчиков от географической широты;
- наличие опресненного приповерхностного слоя воды.

Навигационное обеспечение в условиях подледного использования автономного аппарата необходимо не только для точной координатной привязки проводимых работ, но и в значительной степени для оперативного контроля и гарантии возвращения АНПА к обеспечивающему судну. При удалении аппарата от старовой полыни на расстояние до 10–15 км важно обеспечить надежную гидроакустическую связь с выставленным судовым антенным модулем. При этом обязательным является оперативный текущий контроль состояния этого канала связи, чтобы избежать рисков, связанных с потерей гидроакустического контакта. В этом случае антенный модуль становится приводным акустическим маяком, на который приводится АНПА

после завершения миссии. 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.

Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой, работа которой не требует постановки маяков-ответчиков, 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 с длинной базой в штатном режиме неэффективны из-за дрейфа ледового 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. Во-первых, для определения текущих координат каждого маяка требуется включение в их состав приемника спутниковой навигации, средств передачи координат в пост управления и ввод этих данных для решения навигационной задачи. Во-вторых, для обеспечения нормальной работы маяков с учетом характера вертикального распределения скорости звука в арктических широтах необходимо устанавливать маяки на глубинах не менее 250-300м. Размеры полыни и соответственно измерительной базы маяков ограничены. При этом неучитываемое смещение маяков, устанавливаемых на гибких фалах, приводит к появлению значительных ошибок и сбоев в работе навигации.

В ходе подготовки к экспедиции в высоких широтах была отработана методика использования гирогоризонткомпаса «Octans» и доплеровского лага разработки ИПМТ ДВО РАН. В итоге для навигационного сопровождения АНПА была реализована следующая схема.

По контуру полыни, 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 судового комплекса в качестве постоянных данных. Положения маяков периодически уточнялись, и обновленные данные далее использовались для расчетов. Текущее положение судна и соответственно выставляемой судовой антенны определялось 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 счислялась 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 (рис. 4, а,б). Накапливаемая ошибка системы счисления корректировалась по ряду дискретных точек, в которых расчет местоположения АНПА производился по данным ГАНС ДБ с использованием уточненных координат маяков.

После завершения миссии АНПА выполнял процедуру автоматического выхода на судовой гидроакустический антенный модуль. Наведение осуществлялось при расположении антенного модуля значительно выше АНПА (рабочая глубина антенны составляла 400 м, а АНПА – около 1600 м, наклонная дальность – более 5 км). В таких условиях производилось трехэтапное приведение АНПА к антенне.

На первом этапе АНПА двигался к приводящей антенне, находясь у дна. При таком движении условия приема акустических сигналов изменялись постепенно и незначительно. Во-вторых, движение у дна позволяло использовать доплеровский лаг. При этом счисление производилось с большей точностью, а время поисковых движений – сокращалось. На втором этапе при выходе аппарата на траверс антенны производилось спиралеобразное всплытие аппарата на глубину 50 м. Одновременно на эту же глубину поднималась приводящая антenna. Затем производилось наведение аппарата на антенну на горизонте 50 м. При попадании аппарата в окрестность антенны осуществлялся переход на ручное наведение с использованием акустического канала телеуправления.

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 20м, а затем с глубины 5м) подавались при получении минимальной дальности до судовой антенны (не более 20-25м) и нахождении

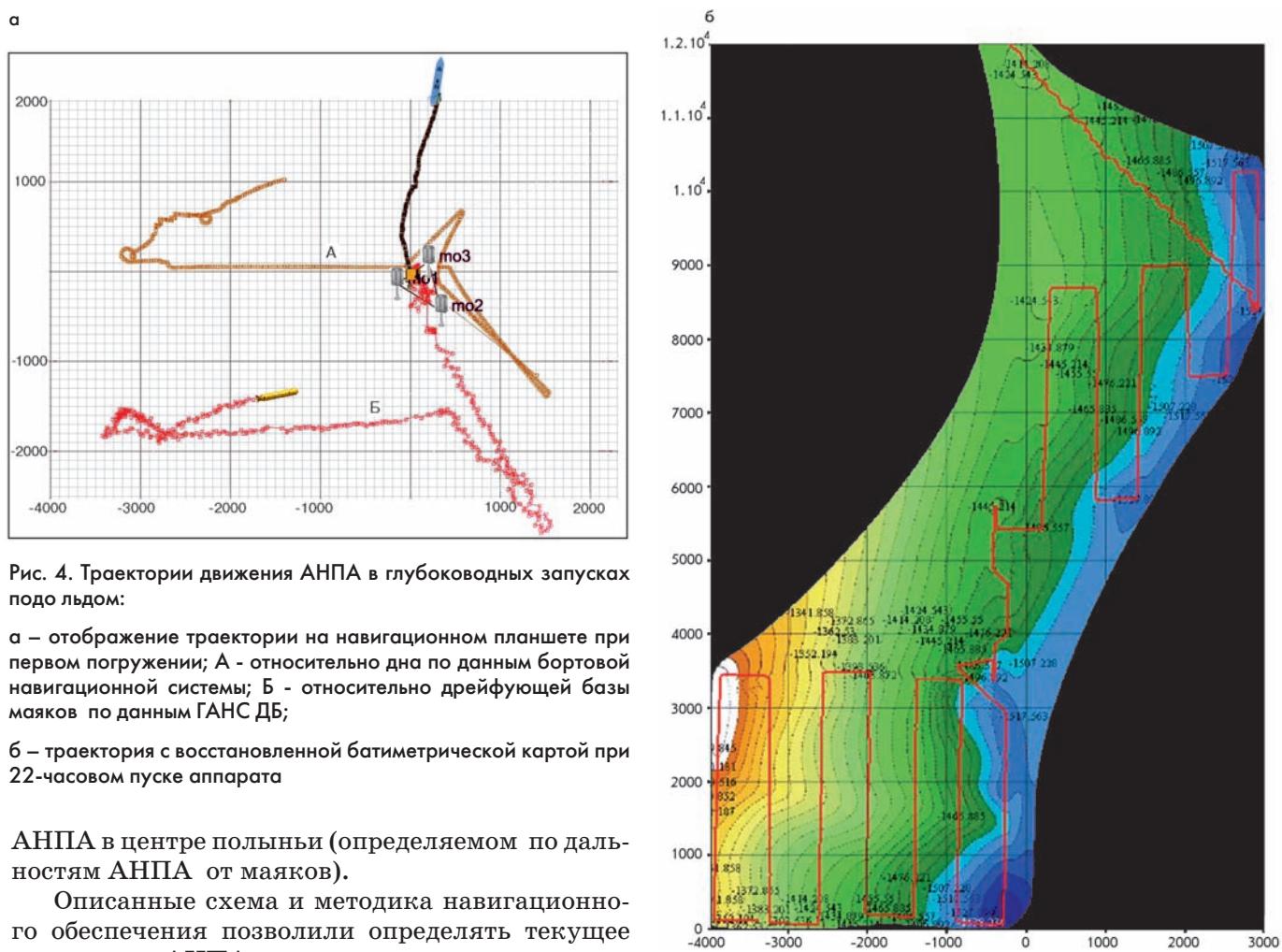


Рис. 4. Траектории движения АНПА в глубоководных запусках подо льдом:

а – отображение траектории на навигационном планшете при первом погружении; А - относительно дна по данным бортовой навигационной системы; Б - относительно дрейфующей базы маяков по данным ГАНС ДБ;

б – траектория с восстановленной батиметрической картой при 22-часовом пуске аппарата

АНПА в центре полыни (определяемом по дальностям АНПА от маяков).

Описанные схема и методика навигационного обеспечения позволили определять текущее положение АНПА, управлять им, контролировать ход выполнения миссии и обеспечивать точный выход аппарата в полынью для всплытия. На заключительной фазе миссии АНПА - всплытии после 22 часов автономной работы – был обеспечен контроль прямой дальности аппарата от судовой антенны и установленных маяков. Ошибка измерения дальности в этот момент не превышала 10м, а при выходе на поверхность АНПА находился в 10-15м от борта носителя и 20-30 м от судовой антенны.

На основании анализа ряда доступных данных можно дать ориентировочную оценку точности навигационной привязки. В ходе продолжительного запуска в течение 22 часов суммарная нескорректированная ошибка бортовой навигационной системы, определенная как расхождение координат точки всплытия, счисленных бортовой навигационной системой, и координат, полученных при обсервации GPS, составила 1370 м или около 60м/ч. Эта ошибка была накоплена и формировалась за счет следующих источников:

- ошибки определения географических координат для стартовой точки начала миссии на дне. При этом координаты точки старта на по-

верхности устанавливались достаточно точно, но при погружении (около 50 мин) АНПА его положение контролировалось ГАНС, использующей дрейфующую базу маяков. Расчетное положение стартовой точки по данным ГАНС корректировалось путем компенсации дрейфа базы маяков с ошибкой около 50 м;

- ошибки бортовой навигационной системы при счислении пути. По данным экспериментов, проведенных во время отладки системы в ходе подготовки к экспедиции, суммарная ошибка счисления не превышала 1% от пройденного пути, что составляет при скорости 1м/с не более 50 м/ч;
- ошибки счисления пути при всплытии АНПА и во время приведения на глубинах, исключающих возможность работы доплеровского лага. При этом данные о скорости аппарата вырабатывались относительным лагом, точность которого существенно ниже точности доплеровского лага. Общая продолжительность работы системы счисления в режиме приведения была не менее 3 часов, что также сказалось на величине суммарной ошибки.

Приведенная оценка не является окончательной, поскольку в принятой структуре навигационного обеспечения заложены дополнительные возможности для коррекции счисленных координат и уменьшения навигационной ошибки. Это достигается прежде всего за счет привязки отдельных точек счисленной траектории к точкам, рассчитанным в этот момент времени по данным ГАНС ДБ с использованием эпизодически уточняемых координат дрейфующих маяков. Ошибка в определении координат, рассчитанных по данным ГАНС ДБ, имеет величину, сравнимую с относительной ошибкой измерения дальностей (не более 1 % для самых неблагоприятных условий работы) и составляет 60 м на дальностях 6000 м. Далее, как уже отмечалось, на борту носителя кроме данных о курсе и скорости принимаются телеметрические данные о глубине, высоте, а также непрерывно контролируется прямая дальность АНПА от приводной антенны с точно известными координатами. Если аппарат выполняет прямолинейные равномерные галсы, то знание параметров дрейфа носителя и перечисленных выше исходных данных позволяет с помощью несложных математических моделей достаточно точно определять координаты аппарата по изменению дистанции до приводящей антенны. Ошибка определения этих координат составляет примерно 2% от текущей дальности (для условий проведенных работ – порядка 100 м).

■ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РАБОЧИХ ПОГРУЖЕНИЯХ АНПА

Хорошая навигационная обеспеченность комплекса «Клавесин» позволила с высокой эффективностью выполнить ряд исследовательских работ при проведении глубоководных погружений подо льдом в высоких широтах. В ходе упомянутой экспедиции подводным аппаратом были выполнены следующие работы:

- батиметрическая съемка участка морского дна площадью 50 км²;
- гидролокационная съемка поверхности морского дна;
- акустическое профилирование грунта;

- маршрутная фотосъемка отдельных участков морского дна;
- измерения температуры и электропроводности морской воды.

Отметим некоторые результаты выполненных работ.

Батиметрическая съемка выполнялась путем прямых измерений глубины аппарата с использованием датчика глубины и измерений расстояния АНПА до дна с использованием эхолокационной системы. При скорости АНПА 1 м/с дискретность полученных данных составляет 1 м. Суммарная ошибка измерения батиметрических данных не превосходит 3 м. Все измерения привязаны к международной системе координат WGS-84. По данным измерений построена батиметрическая карта района (рис. 4,б).

Гидролокационная съемка морского дна выполнялась с помощью гидролокаторов бокового обзора низкой и высокой частоты (НЧ ГБО и ВЧ ГБО). Получены сводное ГБО-изображение (планшет) района работ и отдельные высокоразрешающие фрагменты рельефа морского дна и биологических объектов. Результаты ГБО-съемки дают представление о характере рельефа морского дна и донных объектов различной природы.

Акустическое профилирование морского дна производилось при движении аппарата на расстоянии 30 м от дна. При этом полоса обзора составляла около 30 м, глубина зондирования грунта 30-50 м. На участке обследования была выявлена геологическая структура глубинных и осадочных слоев, позволяющая дать оценку морфологических характеристик строения дна.

Гидрологические исследования включали измерения температуры и электропроводности морской среды. Эти данные использовались для вычисления скорости звука. Выявлен характер температурных зависимостей от глубины и образования вертикального распределения скорости звука. На основании измерений построены вертикальные профили температуры, электропроводности и скорости звука и карта температурного поля вблизи дна.

Фотосъемка морского дна выполнялась с дистанций от 0,75...5,1 м. Представляет интерес наличие на фотоизображениях большого числа биологических объектов, укрывающихся в иле с отверстиями для выхода из него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общ. ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 400с.
2. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. №11. С.35-42.
3. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2. С. 5-14.