

УДК 551.46.077:629.584

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО РОБОТА БЕЗ ОПОРНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ МАЯКОВ

Ю.В. Матвиенко, Н.И. Рылов,
Р.Н. Рылов, А.В. Каморный

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток

Обоснована структура и сделаны предварительные оценки возможности создания системы гидроакустической навигации подводного робота при его контроле с борта сопровождающего судна. Система основана на счислении пути на борту робота и информационном обмене робота с судном. Информация передается в составе навигационного сигнала. Коррекция счисления обеспечивается по координатам навигационной антенны, буксируемой судном. Разработана технология привязки стартовой точки. Приводятся сведения о применении системы при работе в высокоширотной Арктике.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка средств навигационного обеспечения была и остается одной из приоритетных в общей структуре работ, выполняемых при создании подводных роботов [1]. Длительное время среди гидроакустических навигационных систем (ГАНС) наиболее разработанными в методическом и теоретическом плане были системы с длинной базой (ДБ). В России среди первых была разработана система, структура которой и методы обработки сигналов были обоснованы в монографии [2], а особенности распространения сигналов в среде, выбора значений эффективной скорости и собственно решения дальномерной задачи были изучены в работах [3,4]. За время многолетнего практического применения дальномерные системы претерпевали

различные модернизации, связанные в основном с переходом аппаратуры на цифровую элементную базу и новые средства программного обеспечения. Заметными этапами развития ГАНС стали создание средств фазового пеленгования для реализации режима с ультракороткой измерительной базой (УКБ) [4-6] и расширение возможностей навигационных систем средствами информационного обмена между автономным подводным роботом (АПР) и обеспечивающим судном (ОС). Средства информационного обмена служили для передачи команд управления и данных телеметрии. Следующие шаги были сделаны в направлении создания навигационных комплексов, обеспечивающих решение навигационных задач как на борту ОС, так и на борту самого АПР. Навигационная информация гидроакустических систем

дополнялась данными средств бортовой автономной навигации и радионавигационных судовых средств. В целом при комплексной обработке всех доступных данных были достигнуты неплохие показатели и по дальности, и по точности [7]. При этом в навигационном оборудовании носителя особую роль приобрела забортная навигационная антенна.

Прогресс в создании автономных средств бортовой навигации робота стал важным фактором дальнейшего развития устройств, решающих задачи навигации и контроля с борта ОС. В настоящее время созданные бортовые инерциальные системы и системы счисления, основанные на данных точных измерителей абсолютной скорости и курса, могут достаточно точно обеспечивать навигацию аппарата в реальном времени на его борту. Если упомянутая навигационная антенна, наряду с выполнением основных функций, поддерживает информационный обмен между АПР и ОС, обеспечивая сверку координат аппарата, рассчитанных независимыми средствами ОС и АПР, то можно решить задачу навигации и контроля робота также и с борта носителя. Очевидно, задача взаимной навигационной поддержки решается увеличением информационной емкости навигационных сигналов, излучаемых с борта судна и объектом навигации.

Целью настоящей статьи является обоснование возможности построения гидроакустической навигационной системы подводного робота, работающего при поддержке обеспечивающего судна, оборудованного буксируемой судовой навигационной антенной при отсутствии опорных гидроакустических маяков.

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 наблюдаемых 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 АПР. Во-первых, получаемые координатные данные недоступны на борту самого АПР, во-вторых, отсутствует возможность управления аппаратом с

борта судна, в-третьих, достигается меньшая, чем в ГАНС ДБ, навигационная точность. Поэтому судовая антенна в названном режиме наряду с определением текущего положения объекта должна поддерживать с ним информационный обмен.

Если информационный обмен между АПР и судовой антенной обеспечен применением сложных навигационных сигналов, в структуре которых передается навигационная информация, то возможности существующих навигационных комплексов подводных аппаратов [7] расширяются за счет:

- дополнительного канала прямого измерения дальности, что приводит к увеличению надежности и достоверности навигационных данных;
- уменьшения числа или полного исключения постановок маяков при выполнении миссии АПР;
- повышения точности координатной оценки, получаемой при работе углового пеленгатора;
- обеспечения навигационной поддержки АПР минимальными аппаратными средствами без маяков и углового пеленгатора;
- значительного улучшения результатов траекторной обработки дальномерных данных за счет включения в систему фильтрации информации о текущей скорости, курсе и координатах ПА, переданных на борт ОС по информационному каналу.

Ниже обосновывается возможность реализации системы.

Способ навигационного обеспечения автономного подводного робота, контролируемого с борта обеспечивающего судна

Технология решения задачи подводной навигации, основанная на комплексной обработке данных от различ-

ных устройств, разнесенных в пространстве и имеющих канал информационного взаимодействия, в настоящее время активно развивается и, как следует из литературы, может быть реализована различными методами [8-14]. В каждом из них сначала определяют локальные координаты АПР на его борту, счисленные по данным бортовых средств навигации. Далее ошибка счисления корректируется путем периодического определения положения объекта по измеряемым дальностям от серии маяков, предварительно установленных в районе работ. Сами маяки могут быть как стационарными, так и не стационарными [15]. В последнем случае они обладают дополнительными средствами для определения своих текущих координат, например, имея средства спутниковой навигации с размещением элементов маяков на поверхности моря. Причем координаты маяков не устанавливаются перед началом работ на борту подводного аппарата, а передаются от маяков по гидроакустическому каналу связи. Задача коррекции может быть решена также при наличии только одного опорного маяка с измерением дальности до маяка из ряда точек специальной траектории аппарата, которую он выполняет для решения навигационной задачи путем накопления траекторных дальномерных данных [16]. Для обеспечения навигации робота большой автономности и совершающего протяженную миссию (например, в режиме обследования подводного трубопровода или кабеля) сеть маяков устанавливается вдоль трассы работ. Каждый из этих маяков по очереди является опорным в своем районе. Положение подводного робота определяется путем измерения дальности и углового положения маяка, координата-

ты которого предварительно установлены на аппарате. И, в завершение, рассчитанные на борту аппарата навигационные данные передаются на борт обеспечивающего судна с использованием гидроакустической системы связи, позволяя контролировать ход работ в реальном времени. Применение автономных маяков, служащих для коррекции результатов счисления, ограничивает возможности применения таких систем. Для навигационного обеспечения АПР, контролируемого с борта ОС, ниже следует оценка возможности применения в качестве опорного навигационного устройства судовой антенны, снабженной средствами информационного обмена с АПР [17]. В составе навигационного оборудования кроме обычных средств, которыми на борту АПР устанавливаются координаты стартовой точки, счисляют траекторию движения, принимают навигационные сигналы, применены угловой пеленгатор и дальномер для определения собственных координат аппарата относительно судовой антенны и средства передачи оценки координат по гидроакустическому каналу на борт ОС. Судовая навигационная антенна выполнена в виде буксируемого устройства, координаты которого определяются средствами судовой навигации и передаются по гидроакустическому каналу на борт аппарата в составе навигационных сигналов. Кроме того, судовая антенна принимает по гидроакустическому каналу с борта робота навигационный сигнал, содержащий информацию о местоположении робота, рассчитанном на его борту.

При этом судно сопровождает движущийся подводный аппарат вдоль трассы работ. При такой организации навигационного обеспечения достаточная точность достигается

комплексным использованием бортовой навигационной системы и внешних средств коррекции численных координат. Коррекция счисления обеспечивается при траекторной обработке текущих дальномерных данных между судовой антенной и АПР, а также измерением углового положения антенны относительно аппарата. Высокая оперативность и расширение района работ достигаются отсутствием стационарных навигационных маяков. Зона работ ограничена только автономностью и скоростью аппарата, время подготовки системы к работе определяется только временем вывешивания буксируемого устройства, т.е. значительно меньше времени постановки стационарных маяков. Кроме того, отсутствует специальная аппаратура гидроакустической связи аппарата с судном, а информационный обмен обеспечивается аппаратурой навигационной системы за счет применения специальных навигационных сигналов, содержащих необходимую навигационную информацию, что упрощает в целом средства навигации и контроля.

На рис. 1 изображена структурная схема реализации предложенного способа подводной навигации с распределением оборудования на борту подводного робота и обеспечивающего судна.

Аппаратура робота включает:

- систему счисления пути по данным измерителей курса, глубины и абсолютной скорости;
- приемник навигационных сигналов, содержащий измеритель дальности судовой антенны;
- измеритель углового положения судовой антенны (пеленга и угла места);
- устройство обработки навигационного сигнала АПР для

выделения координатной информации;

- средства комплексной обработки навигационных данных;
- передатчик навигационных сигналов, содержащих информацию о текущих координатах робота.

Буксируемая навигационная антенна содержит:

- приемник навигационных сигналов, включающий устройство обработки навигационного сигнала для выделения координатной информации;
- передатчик навигационных сигналов, содержащих информацию о текущих координатах судна.

Перед началом работ навигационными судовыми средствами устанавливается стартовая точка аппарата x_0, y_0 , принимаемая за начало координат в локальной координатной системе. Далее, интегрированием составляющих скорости v_x, v_y на борту аппарата определяются его текущие координаты x_d, y_d . Для коррекции получаемых данных с борта судна излучается навигационный сигнал. Этот сигнал принимается дальномером и угловым пеленгатором на борту аппарата. Вычисленные значения наклонной дальности D , пеленга β и угла места γ судовой антенны передаются в систему комплексирования навигационных данных. Кроме того, навигационный сигнал объединен с информационным сигналом, который содержит информацию о текущих координатах судовой антенны x_c, y_c , получаемых судовыми средствами навигации. Далее на борту робота формируется оценка координат в виде:

$$(x_u, y_u) = (x_c - D \cos \beta \cos \gamma, y_c - D \sin \beta \cos \gamma). \quad (1)$$

Полученные дискретные оценки координат робота комплексуются с непрерывно получаемыми данными x_d, y_d

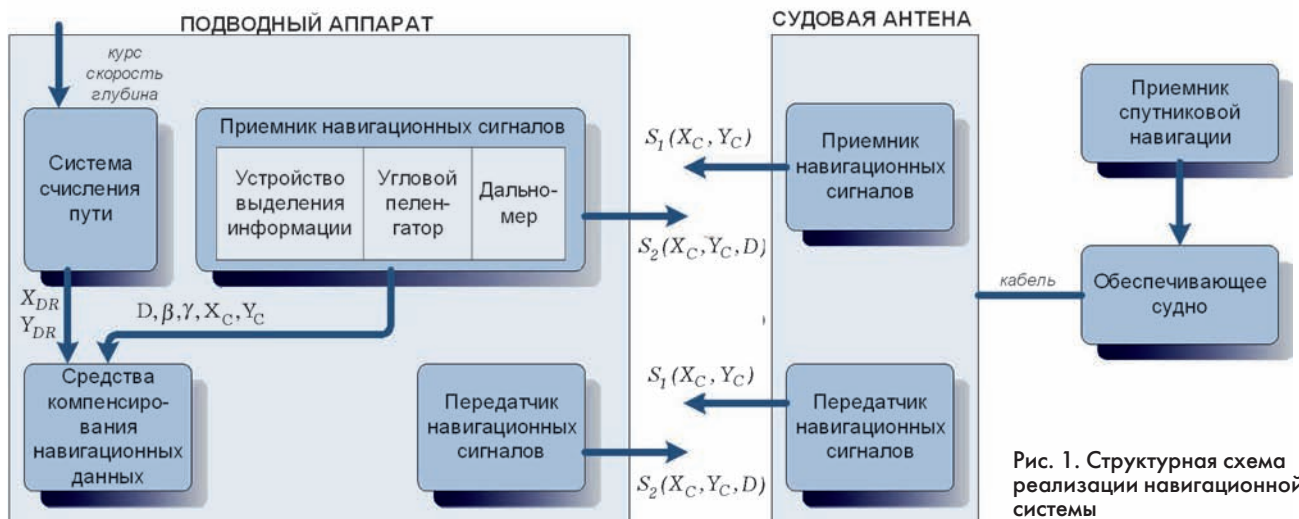


Рис. 1. Структурная схема реализации навигационной системы

и, после фильтрации с использованием алгоритмов [2], формируется взвешенная оценка координат аппарата:

$$(x_a, y_a) = A(x_d, y_d) + B(x_u, y_u), \quad (2)$$

где A , B – операторы комплексирования.

Эти данные в составе кодированной навигационной посылки передаются по гидроакустическому каналу, принимаются аппаратурой судовой антенны, передаются по кабельной линии связи на борт судна и отображаются в реальном времени. В составе судовой навигационной антенны для приема и передачи навигационных сигналов используются одна гидроакустическая антенна и один приемо-передающий тракт аппаратуры. Аналогичный комплект аппаратуры на борту робота дополнен многоэлементной приемной антенной углового пеленгатора и соответствующей аппаратурой обработки многоканальных данных. Навигация АПР, контролируемого с борта ОС осуществляется при перемещении ОС в соответствии с движением робота, выполняющего рабочую программу.

Все средства навигации и контроля (в составе буксируемой судовой антенны) разме-

щены только на обеспечивающем судне, что расширяет зону работы подводного аппарата за счет движения судна.

Определение координат стартовой точки

Предлагаемая схема навигационного обеспечения основана на счислении, и важным этапом работы является точная оценка координат старта объекта навигации, а также координат опорных точек, используемых в ходе выполнения миссии для коррекции результатов счисления. Названные объекты координирования, как правило, излучают навигационные сигналы, а определение их координат выполняется с борта обеспечивающего судна с использованием судовой гидроакустической антенны для приема этих навигационных сигналов. Обычно при координировании синхронно измеряются текущие координаты судовой антенны, буксируемой движущимся судном, и наклонные дальности между источником и этой антенной. В ходе работ судно выполняет специальные галсы вблизи точки постановки источника сигналов и рассчитывает его координаты по алгоритмам, связывающим измеренные наклонные дальности

и координаты буксируемой антенны. Подробно эта технология описана, например в [18]. Для этого способа очень важным является точное измерение наклонной дистанции, для чего необходимы точное измерение времени распространения навигационного сигнала и точное определение эффективной скорости распространения сигнала в районе работ. Наибольшие трудности вызывает оценка эффективной скорости. Ее значение в существенной степени определяется вертикальным распределением скорости звука в районе работ и является различным для разных значений наклонной дальности, что существенно усложняет и увеличивает продолжительность выполнения работы из-за необходимости измерения гидрологических характеристик района и расчета поля скоростей. При проведении реальных работ процедуру определения наклонной дальности обычно упрощают за счет предварительного расчета эффективной скорости звука путем ее аппроксимации от времени распространения сигнала для заданных глубин установки судовой антенны и источника навигационных сигналов. Эффективная скорость аппроксимируется полиномом второй степени времени рас-

пространства t навигационного сигнала:

$$c_e = a_0 + a_1 t + a_2 t^2. \quad (3)$$

Коэффициенты полинома a_0, a_1, a_2 определяются существующими гидрологическими и геометрическими условиями работы. Это позволяет получать относительно точные значения наклонной дальности $D = c_e t$ в широком диапазоне изменений времени распространения, при принятых гидрологических и геометрических условиях работы. Эффективная скорость распространения навигационного сигнала предварительно устанавливается как функция гидрологических характеристик района работ. Имеются специальные методические разработки для выполнения координирования [19].

В условиях неизвестной гидрологии решить задачу определения горизонтальных координат неподвижного подводного источника навигационных сигналов можно за счет избыточных данных при использовании следующего алгоритма.

После погружения на рабочую глубину аппарат фиксирует свое положение в некоторой (стартовой) точке и периодически излучает навигационные сигналы. Обеспечивающее судно буксирует судовую антенну в окрестности места зависания АПР, измеряет время распространения гидроакустических навигационных сигналов в точках нахождения приемной антенны и фиксирует текущие координаты буксируемой антенны в момент приема навигационных сигналов. Антенну перемещают произвольными галсами, охватывающими с различных направлений окрестность места стоянки аппарата. Зафиксированные координаты приемной антенны, полученные на произвольных галсах, формируют в группы, равноудаленные от источника навигационных сигналов. Далее

определение горизонтальных координат источника сигналов решается как задача определения геометрического центра окружности, радиус которой – горизонтальная дальность приемной антенны от источника. Горизонтальная дальность в общем случае является функцией глубин излучающей и приемной антенн, эффективной скорости и времени распространения навигационного сигнала, однако фактически определяется измененными временами их распространения. Затем для каждой группы равноудаленных координатных отсчетов, если их число не менее трех, оцениваются горизонтальные координаты источника X_k, Y_k методами статистической обработки, например методом наименьших квадратов. Расчетные формулы после несложных преобразований приобретают вид:

$$X_k = \frac{c_2 b - c_1 a}{db - a^2}, \quad Y_k = \frac{-c_2 a + c_1 d}{db - a^2} \quad (4)$$

Оценку координат X, Y источника навигационных сигналов получают после осреднения по всем равноудаленным зонам:

$$X = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X_k, \quad Y = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Y_k, \quad (5)$$

$$\text{где } b = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 - \sum_{i=1}^N y_i^2,$$

$$d = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2,$$

$$a = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) - \sum_{i=1}^N y_i x_i;$$

$$c_1 = \frac{1}{2N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \left[\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \right] - \sum_{i=1}^N y_i (x_i^2 + y_i^2);$$

$$c_2 = \frac{1}{2N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left[\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \right] - \sum_{i=1}^N x_i (x_i^2 + y_i^2).$$

В приведенных выражениях $\{x_i, y_i\}$ – группа координатных отсчетов буксируемой антенны, равноудаленных от источника, сформированная для времени распространения навигационного сигнала t_k при установленной ширине временного окна Δt ; N – число координатных отсчетов принятых при расчете в k -й зоне дальности; $i = 1, \dots, N$;

$$K = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\Delta t} - \text{число зон дальности};$$

$t = \{t_{\max}, t_{\min}\}$ – временной интервал распространения навигационных сигналов, зафиксированный при перемещении приемной гидроакустической антенны

Как следует из (4), расчетные значения координат объекта оказываются зависимыми только от координат приемной антенны, фиксированных в равноудаленных зонах, и независимыми от значений эффективной скорости. Эти утверждения основаны на условии, что при равном времени распространения (что задается условиями расчета путем формирования равноудаленных зон) и заданных глубинах установки антенн источника и приемника скорость распространения сигналов в различных точках акватории (по различным горизонтальным направлениям) является одинаковой.

Для оценки достижимых точностных характеристик метода предположим, что буксируемая приемная антенна движется по окружности, в центре которой установлен источник навигационных сигналов (рис. 2). Условием такого движения является равенство времени распространения навигационного сигнала, принимаемого в каждой точке траектории. Точное значение времени не имеет значения. Наличие систематической погрешности измерения времени не влияет на результат координирования. Для приведенной выше модели

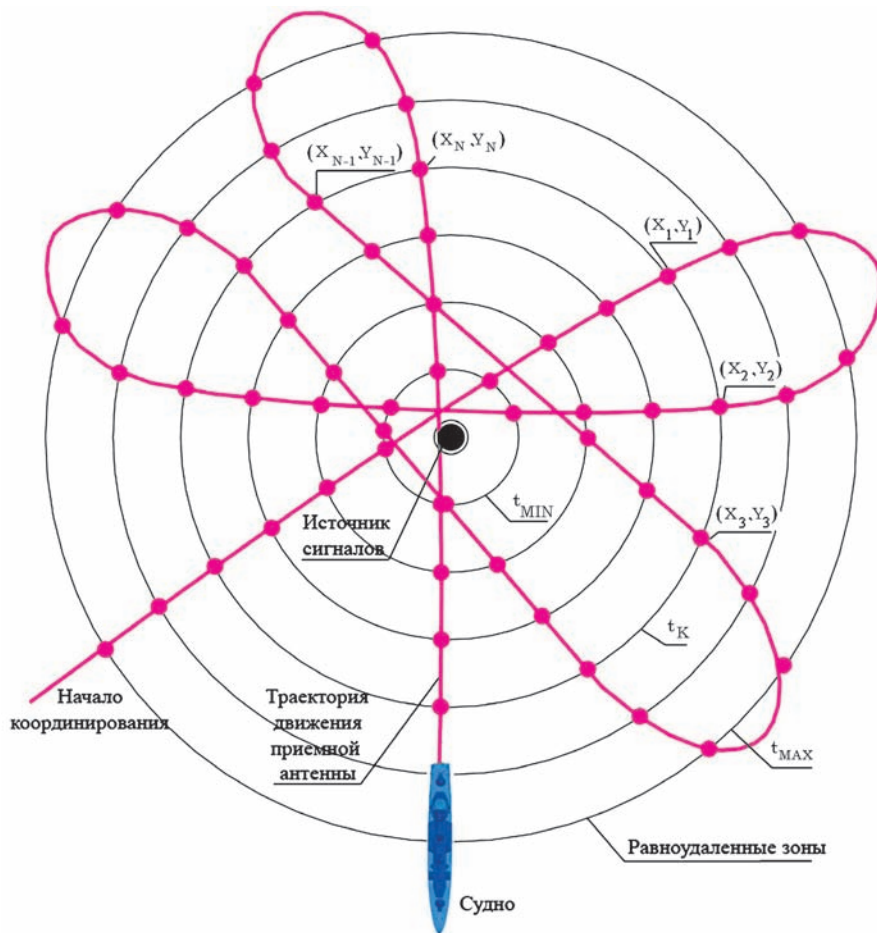


Рис. 2. Определение координат стартовой точки

расчета в этом случае погрешность определения координат неподвижного источника навигационных сигналов σ_M определяется только погрешностью измерения координат буксируемой антенны σ_A и, можно показать, связана с ней зависимостью

$$\sigma_M = \sigma_A \frac{3\sqrt{2}}{2\sqrt{N}}, \quad (6)$$

где N – число отсчетов координат, взятых для выбранного значения времени распространения.

Погрешность определения координат буксируемой антенны определяется погрешностью систем спутниковой навигации и установленной шириной временного окна при формировании равноудаленных зон. Если

принять ее равной 5-10 м, то погрешность определения координат источника может быть меньше 1 м при числе наблюдений несколько сотен. Такой объем данных для координирования легко достигается при движении судна по акватории различными галсами и формировании нескольких десятков равноудаленных зон. Например, при периоде следования навигационных сигналов 10с, за один час координирования накапливаются 360 координатных отсчетов, и этих данных достаточно для определения координат с ошибкой менее 1м. Очевидно, описанный метод может быть применен и для координирования маяков-ответчиков гидроакустических навигационных систем с длинной базой.

Экспериментальная проверка предлагаемой системы

Экспериментальные исследования разработанного метода контроля положения АПР с борта обеспечивающего судна были выполнены с использованием навигационного оборудования АНПА «Клаведин». При проведении работ с борта судна выставлялась судовая антенна, содержащая аппаратуру для реализации ГАНС в режиме ультракороткой базы и аппаратуру информационного обмена с подводным аппаратом. На борту судна устанавливалась аппаратура обработки и отображения информации. На борту АНПА работала система счисления, излучались навигационные и информационные сигналы. В составе информационных сигналов были закодированы текущие навигационные данные как результат работы комплексированной бортовой навигационной системы - численные координаты в горизонтальной плоскости, высота, глубина, курс, скорость. С борта носителя траектория движения АНПА определялась средствами ГАНС УКБ. Принятые и декодированные навигационные данные также отображались на борту носителя. Результаты приведены на рис. 3, а, где сравниваются данные ГАНС УКБ и траектория, рассчитанная по принятым данным телеметрии (скорости и курсе), и рис. 3, б, где сравниваются данные ГАНС УКБ и траектория, отображающая принятые телеметрические значения координат.

Как следует из приведенных примеров, метод контроля и навигации с расчетом координат по данным бортовых средств навигации с последующей передачей полученных данных

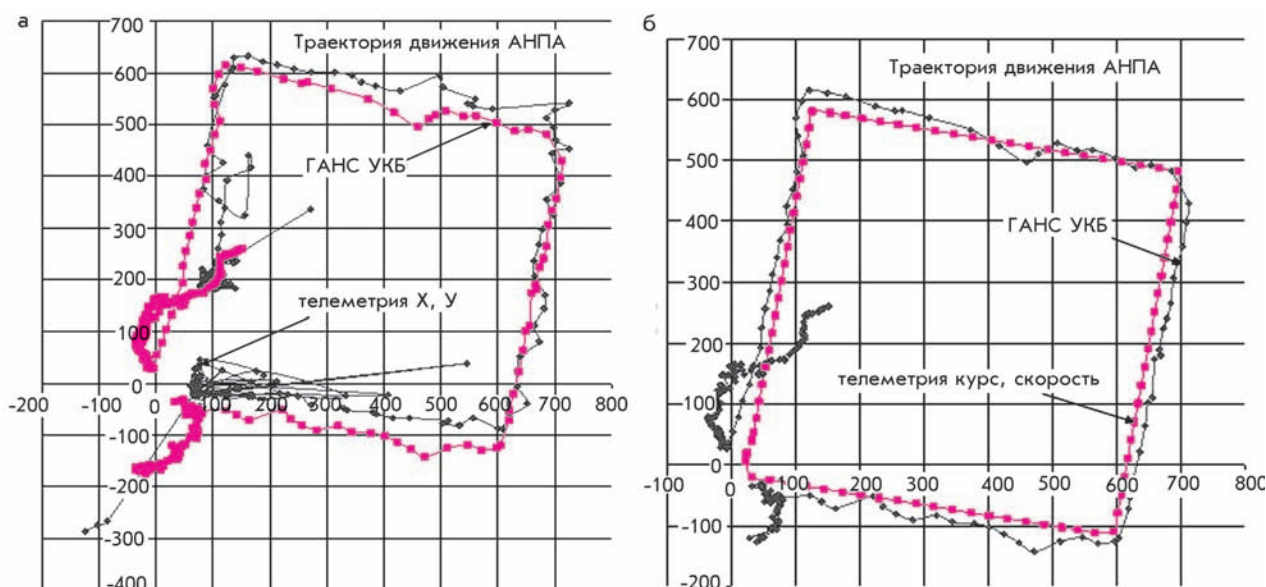


Рис. 3. Экспериментальная проверка навигационной системы подводного робота без опорных маяков

на борт носителя реализуется с использованием минимального набора аппаратуры и, в ряде случаев, нет необходимости для

развертывания средств гидроакустической навигации типа ГАНС ДБ и ГАНС УКБ. Разработанная технология была

использована для выполнения практических работ в экстремальных условиях высокоширотной Арктики [20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Romeo J., Lester G. Navigation Is Key to AUV Missions // *Sea Technology*. 2001. December. P. 24-29.
2. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 248 с.
3. Касаткин Б.А., Кобаидзе В.В. Гидроакустическая синхронная дальнометрическая навигационная система: Пат. 713278 Российская Федерация, МПК G01S 9/66. № 2599058; заявл. 03.04.78; опубл. 05.10.79.
4. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. Л.: Судостроение, 1989. 316 с.
5. Матвиенко Ю.В. Статистическая обработка информации гидроакустической навигационной системы с ультразвуковой базой // *Морские технологии*. Вып.2. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 70-80.
6. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И. и др. Пеленгатор гидроакустической навигационной системы с ультразвуковой базой: Пат. 2179730 Российская Федерация, МПК G 01 S 3/808. № 2000118724/09; заявл. 13.07.2000; опубл. 20.02.2002, Бюл. №5.
7. 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.
8. Uliana M., Andreucci F., Papalia B. The Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle for Antarctic Exploration // *Proc. of OCEANS'97 MTS/IEEE*. 1997.
9. Vestgard K., Hansen R., Jalving B. and Pedersen. H. The HUGIN 3000 Survey AUV – Design and Field Results // *Underwater Intervention*. 2001.
10. Kinsey J.C., Whitcomb L.L. Preliminary Experiments with a Calibration Technique for Gyro and Doppler Navigation Sensors for Precision Underwater Navigation // *Proc. of OCEANS-97 MTS/IEEE*. 1997.
11. Hubert Thomas. Method and device for the monitoring and remote control of unmanned, mobile underwater vehicles: Pat. US5579285, G01C21/00; опубл. 26.11.1996.
12. Larsen Mikael Bliksted. Methods and Systems for Navigating under Water: Pat. WO0165274, G01C21/00; опубл. 07.09.2001.
13. Ageev M.D., Kiselev L.V., Shcherbatjuk A.Ph. Integrated positioning system of underwater robot // *Intervention'9, ROV'90*. Canada, 1990.
14. Ageev M.D., Kiselev L.V., Shcherbatjuk A.Ph. Tasks for underwater robot // *ICAR'91*. Pisa, Italia, 1991.
15. Scherbatjuk A. Integrated Positioning System for Underwater Autonomous Vehicle MT-88 // *Proc. of OCEANS'94*. Vol.3. P. 384-388.
16. Satoshi Tsukioka, Taro Aoki, Takashi Murashima. Experimental Results of an Autonomous Underwater Vehicle "Urashima" // *Proc. of Oceans 2003 conference*. P. 940-945.
17. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Кузьмин А.В., Нургалиев Р.Ф., Рылов Р.Н. Способ навигационного обеспечения автономного подводного робота, контролируемого с борта обеспечивающего судна: Пат. 2344435 Российская Федерация, МПК G01S 3/80. № 2007117288/28; заявл. 08.05.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. №2.
18. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Использование траверсного метода для определения абсолютных координат маяков-ответчиков // *Морские технологии*. Вып.2. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 65-69.
19. Волков А.Е., Галошин А.И., Густов А.А. Руководство по использованию гидроакустических навигационных систем для определения места судна и подводных технических средств при выполнении морских геологоразведочных работ / Мин-во Природных ресурсов, Севморгео. Санкт-Петербург, 1998. 78 с.
20. 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.