

УДК 551.465

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ НАВИГАЦИИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ АППАРАТОВ

**Розман Б.Я., Елкин А.В.**

*ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,  
e-mail: borisdrug@mail.ru, elkin@gnomrov.ru*

В данной статье рассматриваются вопросы подводной навигации телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Для повышения эффективности и точности работы ТНПА целесообразно использование наряду с инерциальными также и гидроакустических систем позиционирования, позволяющих определять текущие координаты и передавать их на монитор оператора. Поскольку, как известно, GPS в воде не работает, но зато хорошо работает гидроакустическая аппаратура: гидрофоны, эхолоты, сонары, звуковизоры, маяки-ответчики и т.д. В них используются сигналы звукового и ультразвукового диапазона частот. Для обнаружения препятствия используются эхолот, альтиметр и гидролокатор кругового обзора. Координата рассчитывается посредством комплексирования данных с трех систем счисления пути: визуальной, инерциальной, координатной. Таким образом, задача перемещения в трехмерном пространстве сводится к решению двух задач на плоскости: определение направления (горизонтальная плоскость) и скорости движения (вертикальная плоскость). Разработанное программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме выделять контуры объектов (динамическое увеличение контрастности изображения для оператора), отслеживать смещение выделенных контуров в видеоряде с оценкой вектора смещения для системы динамического поддержания заданного курса и положения ТНПА, а также для системы визуального счисления пути. В статье рассматриваются технологии навигации средствами гидроакустики и бортовых инерциальных систем управления движением. Рассмотрены также подсистемы телекоммуникации, сбора, обработки данных с датчиков и визуализации данных телеметрии на экране монитора, а также системы технического зрения, адаптивного счисления пути.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, робототехника, океан, исследования, наука

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF UNDERWATER NAVIGATION SYSTEMS FOR REMOTE-CONTROLLED VEHICLES

**Rozman B. Ya., Elkin A. V.**

*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow,  
e-mail: borisdrug@mail.ru, elkin@gnomrov.ru*

This article discusses the issues of underwater navigation of remote-controlled uninhabited underwater vehicles. To increase the efficiency and accuracy of the TNPA operation, it is advisable to use, along with inertial, also hydroacoustic positioning systems that allow determining the current coordinates and transmitting them to the operator's monitor. Since, as you know, GPS does not work in water, but sonar equipment works well – hydrophones, echo sounders, sonars, sound imagers, responder beacons, etc. They use signals of the acoustic and ultrasonic frequency range. An echo sounder, an altimeter and an all-round sonar are used to detect an obstacle. The coordinate is calculated by combining data from three path number systems: visual, inertial, coordinate. Thus, the problem of moving in three-dimensional space is reduced to solving two problems on a plane: determining the direction (horizontal plane) and the speed of movement (vertical plane). The developed software allows you to automatically select the contours of objects (dynamic increase in image contrast for the operator), track the displacement of the selected contours in the video sequence with an estimate of the displacement vector for the system of dynamic maintenance of a given course and position of the TNPA, as well as for the visual path numbering system. The article discusses navigation technologies by means of hydroacoustics and on-board inertial motion control systems. The subsystems of telecommunications, data collection, processing from sensors and visualization of telemetry data on the monitor screen, as well as systems of technical vision, adaptive path counting are also considered.

**Keywords:** underwater vehicle, robotics, ocean, researches, science

Перечень условных сокращений

БИНС – Бесплатформенная инерциальная навигационная система

ГАНС – Гидроакустическая навигационная система

ТНПА – Телеуправляемый обитаемый подводный аппарат

ИНС – Инерциальная навигационная система

ДУС – Датчик угловых скоростей

В данной статье рассмотрены вопросы ориентации ТНПА в водной среде. Для эффективной работы ТНПА [1] необходимо

использование гидроакустических систем позиционирования, позволяющих определять текущие координаты и передавать их на монитор оператора. Поскольку, как известно, GPS в воде не работает, но зато хорошо работает гидроакустическая аппаратура: гидрофоны, эхолоты, сонары, звуковизоры, маяки-ответчики и т.д. В них используются сигналы звукового и ультразвукового диапазона частот. В статье рассматриваются технологии подводной ориентации средствами гидроакустики и управления движением на основе этих данных.

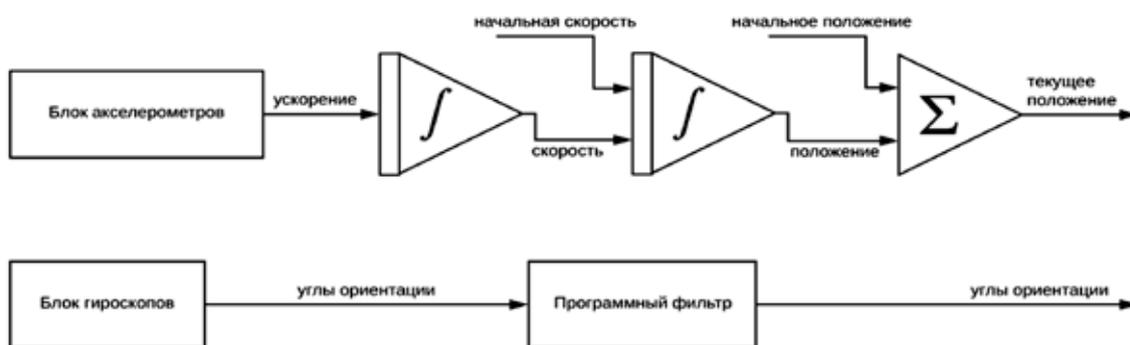


Рис. 1. Структурная схема инерциальной навигационной системы

Рассмотрены также подсистемы телекоммуникации, сбора, обработки данных с датчиков и визуализации данных телеметрии на экране монитора, а также системы технического зрения, адаптивного счисления пути.

Сами авторы статьи – опытные разработчики отечественных малогабаритных ТНПА легкого класса (вес до 30 кг). Ими накоплен большой опыт разработок и эксплуатации ТНПА в разных видах работ. Далее рассмотрен ряд разработок, позволяющих усовершенствовать существующие ТНПА и повысить эффективность работ с ними.

В ходе работ были созданы соответствующие аппаратные и программные модули. Реализованы функции, позволяющие производить независимую настройку отдельных компонент системы [2].

Разработаны аппаратные и программные части модуля технического зрения.

Выбраны требуемые параметры бортового микрокомпьютера, произведена организация интерфейса между видеокамерой, бортовым вычислителем, береговой станцией и платформой ТНПА. Произведена первичная настройка микрокомпьютера платформы ТНПА.

Разработан алгоритм счисления пути на базе системы технического зрения. Алгоритм реализует предварительную обработку изображения, выделение и кластеризацию объектов.

В процессе работы был реализован интерфейс платформы с акустическими датчиками и алгоритмами автоматического и полуавтоматического (директивного) движения в заданную точку. Алгоритмы автоматического обхода препятствий, включающие в себя логику построения оптимальной траектории.

Повышение эффективности подводных работ за счет использования последних разработок ведущих фирм в области гидроакустических систем и бортовых инерциальных систем подводной навигации.

Установка и интеграция сенсоров в информационно-управляющую систему ТНПА.

Аппаратная интеграция.

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы нашли широкое применение в подводной робототехнике [3]. По сравнению с другими инерциальными навигационными системами БИНС обладают следующими преимуществами:

- универсальность;
- меньшие стоимость, размеры, масса;
- простота в использовании и интеграции в систему.

В отличие от платформенной ИНС, БИНС не имеет в составе гиросtabilизирующей платформы для выставления вертикали места и стабилизации своих датчиков. Отсутствие такого дорогостоящего и технически сложного устройства сказалось на повышении надежности, уменьшении времени интеграции в систему и, конечно же, на уменьшении стоимости.

Типовая схема ИНС представляет собой блок ДУС, блок акселерометров, набор интеграторов и сумматоров. Структурная схема изображена на рис. 1. Данная схема имеет ряд существенных недостатков, основной из которых – дрейф показаний датчиков и, как следствие, постепенное накопление ошибки определения положения [4]. При работе не в воде данная ошибка нивелируется наличием данных с GPS-модуля. При разработке системы ориентации комплекса ставилась задача минимизировать или исключить накопление данной ошибки и добиться длительной стабильной работы ИНС.

#### Материалы и методы исследования

В ходе анализа вышеперечисленных проблем и методов их решения был выявлен перечень изменений в структуре системы, определяющий ее конечный состав. Главными проблемами являются дрейф нулевой точки ДУСов и высокий уровень зашумлен-

ности данных акселерометров, приводящие со временем к неточным выходным данным. Как следствие, может возникнуть ошибка определения положения горизонта, при котором вертикальные перемещения могут стать причиной изменения показаний координат в других осях из-за паразитной составляющей силы, направленной вдоль перпендикулярных осей чувствительности датчиков. Помимо этого инерциальные датчики не позволяют определить ориентацию относительно магнитных полюсов планеты. Для решения этой задачи необходимо добавить в систему трехосевой магнитометр. Комплексование данных с магнитометра и ДУСов позволяет компенсировать накапливающуюся ошибку из-за дрейфа нуля и определить угол курса с достаточной достоверностью.

Для получения информации об ориентации ТНПА в пространстве, а также для получения данных, используемых в блоке инерциального счисления пути, был выбран модуль БИНС MTi-600 фирмы X-sense (Нидерланды). Надо отметить, что эти модули изначально предназначались для воздушных беспилотников. В состав данной БИНС входят трехосевые ДУС, акселерометр и магнитометр, а также вычислительный блок. Использование готовой БИНС позволило распределить вычислительные нагрузки. Архитектура модуля MTi-600 представлена на рис. 2.

Данный модуль содержит несколько интерфейсов связи: CAN, RS232, UART.

- CAN (Controller Area Network)

- Сеть контроллеров (CAN-шина) – это надежный стандарт, предназначенный для

обеспечения связи между устройствами в приложениях без главного компьютера. Интерфейс CAN MTi-600 не имеет согласующего резистора. Его можно использовать в шине CAN, которая уже имеет требуемую оконечную нагрузку. Если используется соединение с одним устройством, между выводами CAN\_H и CAN\_L необходимо добавить оконечный резистор 120 Ом.

- RS232 с управлением потоком RTS/CTS

- Интерфейс RS232 соответствует стандартным уровням напряжения RS232. Он включает аппаратное управление потоком через линии RTS и CTS.

- UART

Интерфейс UART можно использовать для прямого подключения к MCU с уровнями ввода-вывода 3,3 В. Пользователь может настроить модуль MTi серии 600 для связи через UART. Конфигурация кадра UART – 8 бит данных, без контроля четности и 1 стоповый бит (8N1). Протокол UART имеет только линии TX и RX без какого-либо управления потоком.

Для сопряжения с информационно-управляющей системой ТНПА используется интерфейс UART. Применение данного интерфейса обусловлено наличием свободных периферийных модулей бортового вычислителя ТНПА. По сравнению с RS-232 UART не требует использования преобразователей уровней сигналов, что позволило сохранить ранее отработанные схемотехнические решения. Также данный интерфейс является самым быстрым. В табл. 1 представлены диапазоны скоростей обмена модуля MTi-600.

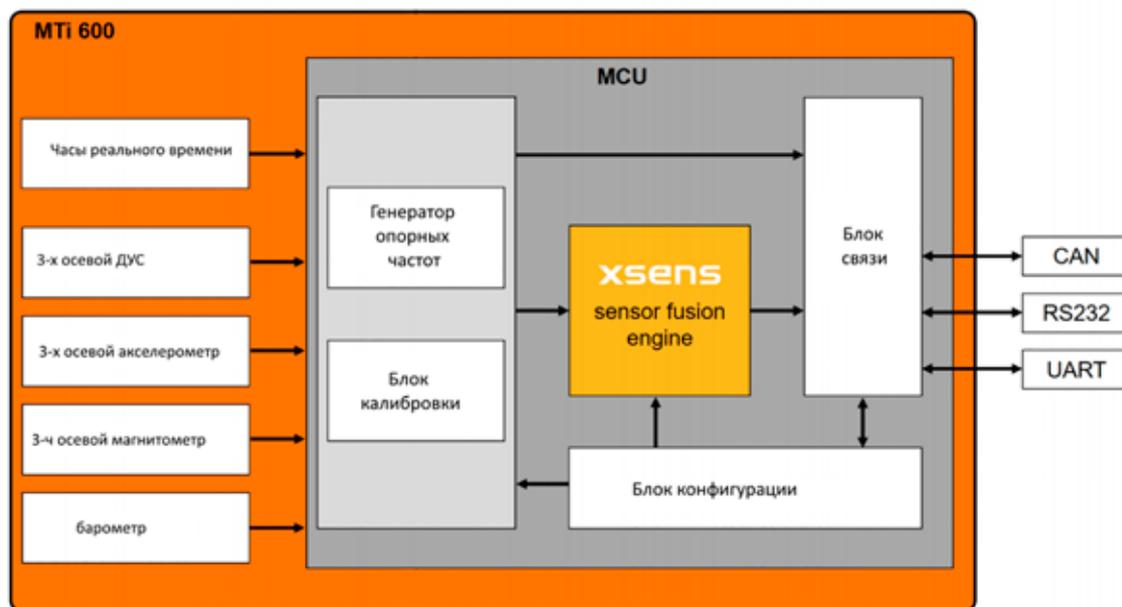


Рис. 2. Архитектура модуля MTi-600

**Таблица 1**

Скорость обмена данными с модулем

Интерфейс	Мин	Макс	Единица измерения
CAN	10.0	1000	кбит/с
RS232	4.8	1000	кбит/с
UART	4.8	2000	кбит/с

Обмен с модулем происходит на скорости 2 Мбит/с. Данные, полученные от модуля, используются в системе стабилизации курса управляющей системы ТНПА, а также по каналу передачи телеметрии поступают в береговую станцию, для отображения на мониторе оператора, а также для дальнейшей передачи в платформу ТНПА. Для обмена данными с модулем MTi-600 используется протокол XBus.

Для установки на ТНПА выбрана гидроакустическая навигационная система Evologics S2C 18/34. Основные характеристики представлены в табл. 2, внешний вид – на рис. 3.

**Таблица 2**

Основные характеристики гидроакустической системы Evologics S2C 18/34

Наименование	Описание	Основные характеристики
Evologics S2C 18/34	ГАНС УКБ	Всенаправленный модем Дальность связи до 3,5 км Частота коммуникаций 18–34 кГц Скорость: до 13,9 кбод/с Интерфейс подключения: Ethernet или RS-232 Максимальная мощность при передаче: 65 Вт, номинальная 35 Вт Питание 24 В Габариты: 11x18x27 см Вес: 2 кг



Рис. 3. Внешний вид модема Evologics S2C 18/34

Гидроакустический модем работает в режиме маяка-ответчика и не требует интерфейсного подключения к ТНПА. Информация с наземной станции ГАНС напрямую поступает в береговую станцию ТНПА.

Далее по интерфейсу связи передается в управляющую платформу ТНПА. Программное обеспечение разработано на языке программирования C++. В программном обеспечении платформы ТНПА предусмотрены следующие режимы автоматического движения ТНПА: движение в толще воды; движение по траектории вдоль поверхности дна; движение вдоль произвольной поверхности

Движение в толще воды предполагает отсутствие визуальных данных, используемых системой технического зрения в системе счисления пути, отсутствие препятствий. В общем случае ТНПА перемещается по прямолинейной траектории заданной двумя точками. Схема движения представлена на рис. 4. В данном режиме в системе счисления пути используются только данные с БИНС и гидроакустического оборудования, установленных на ТНПА.

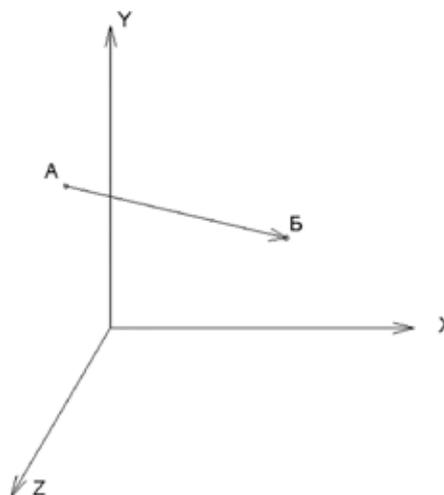


Рис. 4. Схема движения ТНПА

Для решения задачи перемещения ТНПА из точки А в точку В в автоматическом режиме декомпозируем данную задачу на следующие составляющие: определение необходимого направления (задание курса), расчет скорости горизонтального движения, расчет скорости вертикального движения.

По данным ГАНС [5] определяются координаты точки А. Далее определяется время, необходимое для перемещения (формула (1)), исходя из заданной скорости, ограниченной периодом обновления текущей координаты и ограничениями датчиков. Далее рассчитываются вертикальная и горизонтальная скорости по формуле (2):

$$t = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{V_{max}}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_x = \frac{x_2 - x_1}{t} \\ v_y = \frac{y_2 - y_1}{t} \end{cases} \quad (2)$$

Следующим шагом, используя заданные координаты точки Б, рассчитывается направление на точку Б из точки А по формуле

$$\varphi = \arctg \left( \frac{|z_1 - z_2|}{|x_1 - x_2|} \right) \quad (3)$$

Задания скорости и направления движения рассчитываются при каждом обновлении данных координатной системы счисления пути. Движение по траектории вдоль поверхности дна. Траектория движения задается набором путевых точек и скоростью движения между точками. Движение между двумя последовательными точками описано в предыдущем пункте.

Движение вдоль поверхности дна подразумевает наличие как гидроакустических, так и визуальных данных, а также возможное наличие препятствий. Данный режим предполагает движение параллельно поверхности дна с заданными отстоянием и скоростью, и автоматическим обходом препятствий по оптимальной траектории. Обход препятствий осуществляется с приоритетом сохранения отстояния от дна.

В таком режиме регуляторы обеспечивают движение аппарата с заданной маршевой скоростью относительно грунта  $V_3$  и с заданным отстоянием от дна  $h_3$ , стабилизируя расчетный курс движения. Ошибка отстояния от дна  $h_0$  рассчитывается как разница между заданным значением и средним измеренным значением. Диапазон допустимой ошибки задается оператором.

В нашем случае аппарат не имеет контуров управления углами крена и дифферента, следовательно, эти углы считаются нулевыми. Поэтому решаем задачу автоматического движения по траектории только вдоль вертикальной поверхности произвольной формы.

Данный режим позволяет двигаться по заданной траектории вдоль вертикальной поверхности произвольной формы с сохранением дистанции до оной. Для работы данного режима, так же как и для предыдущего, требуется наличие визуальных данных для работы системы счисления пути.

При такой схеме движения управляющая система Платформы ТНПА обеспечивает перемещение ТНПА от точки к точке с заданной скоростью по глубине (рис. 5), компенсирование бокового сноса, а также

стабилизирует перпендикулярность продольной строительной оси  $x$  аппарата по данным эхолота и ГКО.

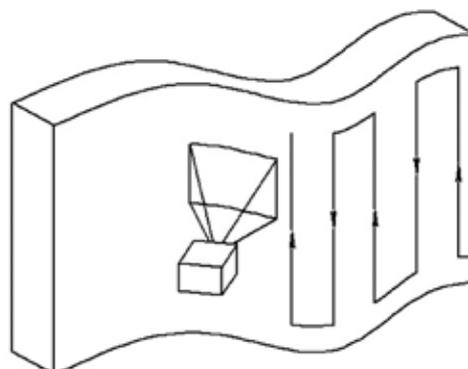


Рис. 5. Схема движения ТНПА

Обмен с модулем происходит на скорости 2 Мбит/с. Данные, полученные от модуля, используются в системе стабилизации курса управляющей системы ТНПА, а также по каналу передачи телеметрии поступают на береговую станцию, для отображения на мониторе оператора, а также для дальнейшей передачи в платформу ТНПА.

Программное сопряжение. Для обмена с модулем МТi-630 используется протокол XBus. Данный модуль содержит несколько интерфейсов связи: CAN, RS232, UART; CAN (Controller Area Network).

Сеть контроллеров (CAN-шина) – это надежный стандарт, предназначенный для обеспечения связи между устройствами в приложениях без главного компьютера. Интерфейс CAN МТi-600 не имеет согласующего резистора. Его можно использовать в шине CAN, которая уже имеет требуемую оконечную нагрузку. Если используется соединение с одним устройством, между выводами CAN\_H и CAN\_L необходимо добавить оконечный резистор 120 Ом.

– RS232 с управлением потоком RTS/CTS.

Интерфейс RS232 соответствует стандартным уровням напряжения RS232. Он включает аппаратное управление потоком через линии RTS и CTS.

– UART

Интерфейс UART можно использовать для прямого подключения к MCU с уровнями ввода-вывода 3,3 В. Пользователь может настроить модуль МТi серии 600 для связи через UART. Конфигурация кадра UART – 8 бит данных, без контроля четности и 1 стоповый бит (8N1). Протокол UART имеет только линии TX и RX без какого-либо управления потоком.

Для сопряжения с информационно-управляющей системой ТНПА использу-

ется интерфейс UART. Применение данного интерфейса обусловлено наличием свободных периферийных модулей бортового вычислителя ТНПА. По сравнению с RS-232 UART не требует использование преобразователей уровней сигналов, что позволило сохранить раннее отработанные схемотехнические решения. Также данный интерфейс является самым быстрым. В табл. 1 представлены диапазоны скоростей обмена модуля МТi-630.

### Заключение

Проработаны интерфейсы платформы ТНПА с гидроакустическими и инерциальными сенсорами с учетом необходимой пропускной способности канала для обеспечения скоростей передачи данных [6]. Разработаны алгоритмы обработки и интерпретации данных принимаемых с гидроакустических и инерциальных сенсоров. Произведена интеграция сенсоров в информационно-управляющую систему ТНПА. Реализованы алгоритмы автоматического перемещения ТНПА из точки А в точку Б.

Кроме того, реализованы функции, позволяющие производить независимую настройку отдельных компонент системы.

Произведена разработка алгоритмов полуавтоматического и автоматического движения на базе систем счисления пути акустической навигационной системы. Алгоритмы обеспечивают автономное движе-

ние ТНПА между заданными точками с автоматическим обходом препятствий.

Для коммуникации между акустическими компонентами и платформой ТНПА в виде соответствующих наборов команд использован протокол Modbus, а также пользовательский интерфейс с графикой на мониторе.

*Статья написана в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0011.*

### Список литературы

1. Conte G., Serrani A. Robust control of a remotely operated underwater vehicle. *Automatica*. 1998. Vol. 34. No. 2. P. 193–198.
2. Елкин А.В., Комаров В.С., Розман Б.Я. Телеуправляемые подводные аппараты-роботы «ГНОМ» // Освоение морских глубин: сборник статей. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2018. С. 332–336.
3. Константян В.Н., Нахушев Р.С., Яхутлов У.М. Система инерциальной навигации комплекса симуляции полета // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 4. С. 97–103.
4. Козинев А.В., Северов С.П. Визуализация управляемого движения подводного робота // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ 2013): материалы XIII Международной научно-технической конференции. М.: АПР, 2013. Т. 1. С. 338–343.
5. Розман Б.Я., Елкин А.В. Конструкция подводного аппарата «СУПЕРГНОМ». М.: ООО «Издательство “Маджента”», 2018. С. 27–29.
6. Мокиевский В.О., Спиридонов В.А., Цетлин А.Б., Краснова Е.Д. Современные дистанционные методы в изучении морских донных сообществ и ландшафтов прибрежной зоны // Труды Беломорской биостанции МГУ. 2012. Т. 11. С. 3–6.