

УДК 551.46.07

Особенности отработки информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата

*Иноземцев В.В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»*

*Научный руководитель: Егоров С.А., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru*

В настоящее время в НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана ведется разработка комплекса автономных необитаемых подводных аппаратов с групповым управлением, предназначенных для проведения осмотровых работ. Большое значение в создании данных аппаратов имеет отработка их информационно-управляющей системы (ИУС).

Бортовая ИУС представляет собой набор всего необходимого оборудования (датчики, вычислители, периферийные платы и пр.) и программного обеспечения для формирования управляющих сигналов на движительно-рулевой комплекс и выдачу требуемой информации о состоянии и параметрах движения аппарата на пульт оператора. Основой ИУС являются алгоритмы системы управления (СУ). Прочие аппаратно-программные компоненты ИУС служат для обеспечения работы СУ. Таким образом, требования к структуре и составу компонентов ИУС формируются на основе требований к СУ, которые, в свою очередь, формируются по требованиям, предъявляемым к аппарату: количество управляемых координат, точность стабилизации управляемых координат и т.д. Для рассматриваемого АНПА возможно непосредственное управление маршевой скоростью, курсом, креном и дифферентом. Также возможно управление глубиной за счет управления маршевой скоростью и дифферентом аппарата. От него требуется высокая точность удержания углов ориентации. Аппарат поддерживает программные режимы работы, такие, как движение по траектории и выход в точку.

Структура ИУС АНПА показана на рис. 1. Условно ИУС АНПА можно разделить на бортовую и пультовую части.

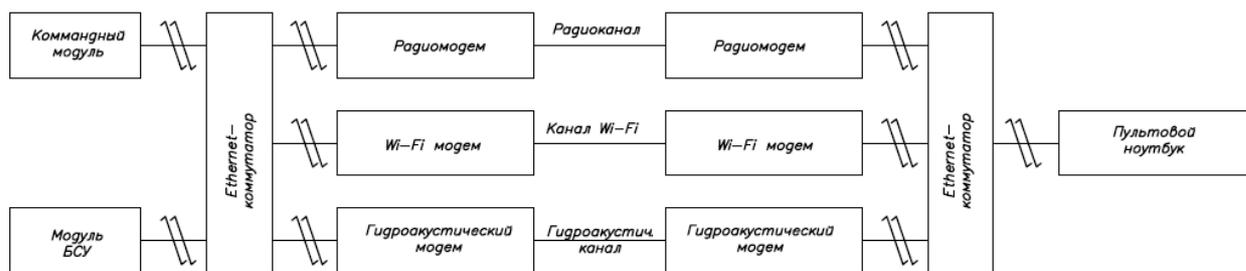


Рис. 1. Структура ИУС АНПА

Бортовая часть ИУС встроена непосредственно в АНПА. Ее вычислительной основой являются командный модуль (КМ) и модуль бортовой системы управления (БСУ). Бортовые устройства АНПА могут вести обмен с пультной частью посредством трех каналов: канала Wi-Fi, канала радиомодема и канала гидроакустического модема. Каналы Wi-Fi и радиомодема доступны только при нахождении АНПА на поверхности. Канал Wi-Fi имеет большую скорость обмена, однако малую дальность действия. При большом удалении АНПА от судна-носителя целесообразно использовать радиомодем.

Модуль бортовой системы управления выполняет алгоритмы бесплатформенной системы ориентации (БСО) на основании обработки датчиков БСО, алгоритмы СУ по удержанию углов курса, крена, дифферента, заданной глубины или отстояния от дна, алгоритмы блока формирования сигналов на движительно-рулевой комплекс (БФС ДРК). К модулю БСУ подключены контроллеры движителей, на которые поступают заданные сигналы с БФС ДРК. Таким образом, модуль БСУ выполняет базовые задачи ориентации и управления движением АНПА.

Командный модуль отвечает за навигацию и обмен данными с АНПА. Алгоритмы КМ обрабатывают данные с GPS-приемника, на основании чего определяются глобальные географические координаты АНПА, а также координаты АНПА относительно заданной реперной точки. В режимах выхода в точку и движения по траектории КМ формирует для модуля БСУ заданные параметры движения. КМ также отвечает за состояние каналов связи с пультной частью комплекса. Дополнительная задача КМ состоит в управлении электропитанием бортовых систем АНПА.

Бортовая аппаратура отсека управления, связи и навигации АНПА показана на рис. 2.



Рис. 2. Бортовая аппаратура отсека АНПА

Пультовая часть ИУС состоит из пультового ноутбука и блока связи. Блок связи (рис. 3) включает в себя модем Wi-Fi, радиомодем и приемопередатчик гидроакустического модема. Блок связи отвечает за обеспечение связи между пультовым ноутбуком и бортовыми вычислителями АНПА. Пультовый ноутбук подключен к блоку связи по сети Ethernet.

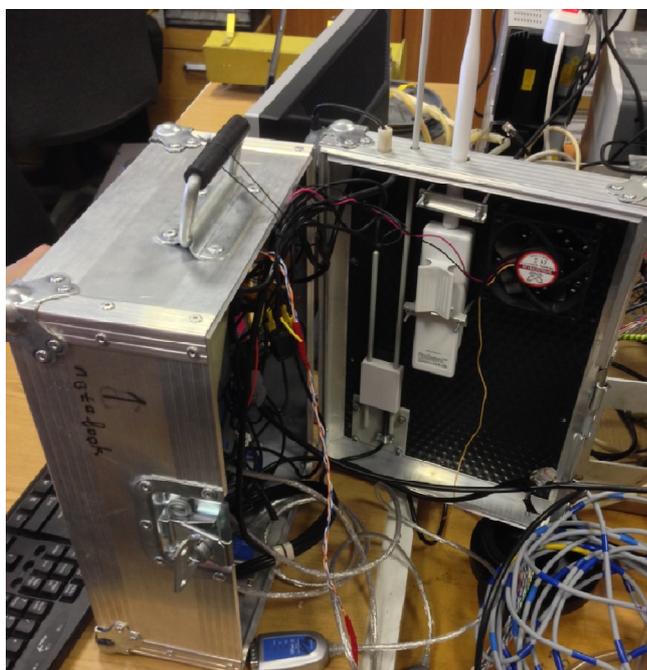


Рис. 3. Блок связи комплекса

Пульт управления АНПА (ПУ АНПА) предназначен для управления движением АНПА, управления и диагностики систем комплекса. ПУ АНПА представляет собой ноутбук с пультным программным обеспечением. Пульт управляется при помощи

«мышки» и рукоятки управления движением АНПА (РУД АНПА), имеющей 4 независимых канала управления.

Внешний вид ПУ АНПА показан на рис. 4.

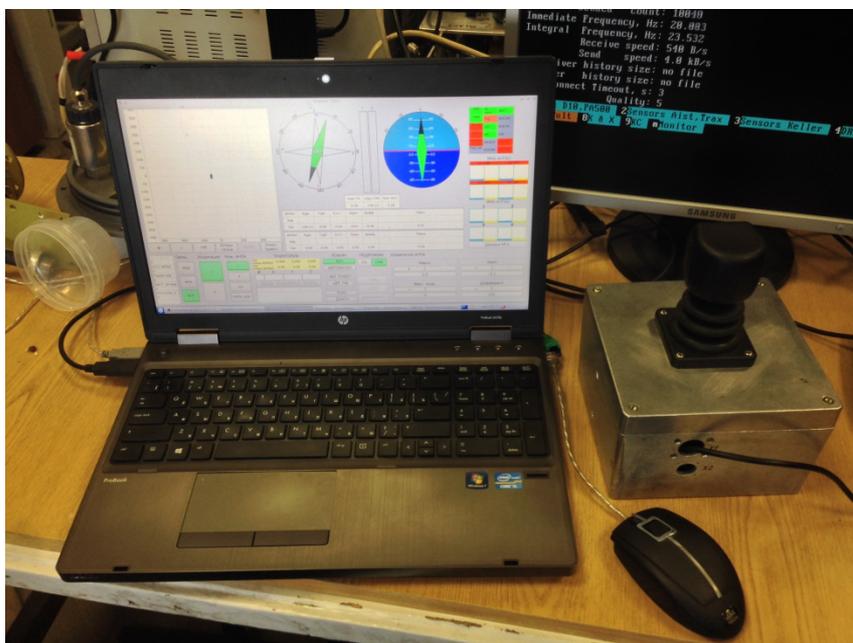


Рис. 4. Внешний вид ПУ АНПА

Пультовой ноутбук работает на ОС Linux. Пультовая программа управления АНПА (интерфейс программы показан на рис. 5) написана с использованием библиотеки Qt.

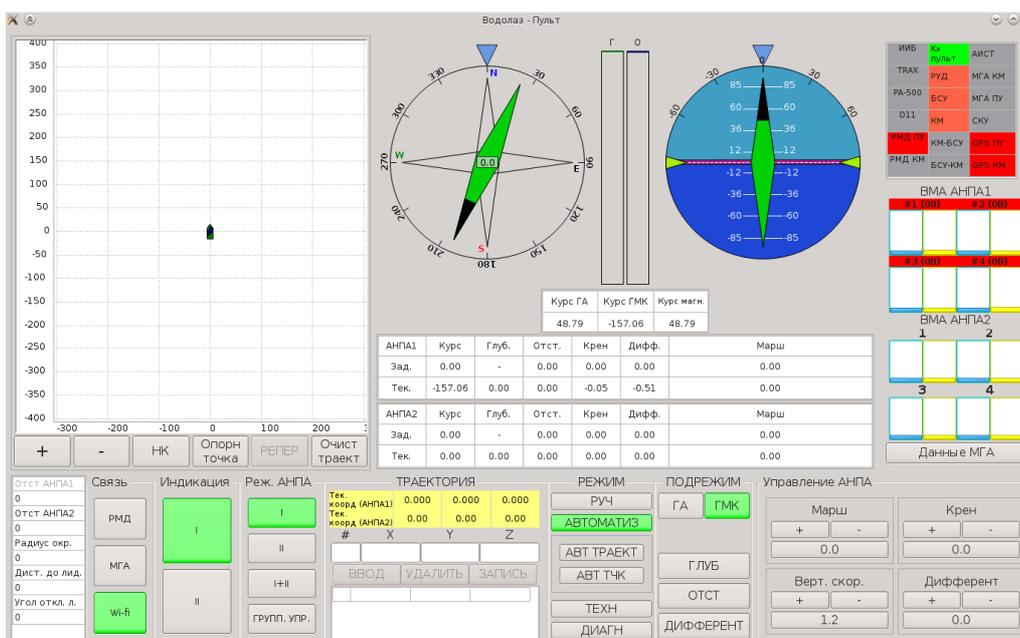


Рис. 5. Внешний вид пультовой программы

Отличительной особенностью данного комплекса является возможность совместной работы нескольких АНПА. При этом определяются ведущий и ведомые АНПА. Траектория движения ведомых АНПА вычисляется на основании траектории ведущего АНПА [1].

В ИУС АНПА предусмотрены следующие режимы работы:

- «Ручной»;
- «Автоматизированный»;
- «Выход в точку»;
- «Движение по траектории».

Все четыре режима предназначены для выполнения работ, определяемых функциональным назначением комплекса.

В режиме «Ручной» осуществляется управление АНПА с ПУ при помощи РУД и интерфейса пультовой программы. Маршевая скорость задается с ПУ, управление курсом, креном и дифферентом осуществляется при помощи РУД. Возможна фиксация значения заданной маршевой скорости. При этом все контуры управления движением АНПА работают в разомкнутом режиме. В режиме «Автоматизированный» осуществляется управление маршевой скоростью АНПА, углами курса, крена и дифферента (соответствующие контуры замкнуты). Дифферент задается в зависимости от выбранного подрежима режима «Автоматизированный». Если выбран подрежим «Дифферент», то дифферент задается непосредственно в интерфейсе пульта. В случае выбора подрежима «Глубина/Отст.» оператор при помощи РУД формирует заданную глубину погружения или отстояние АНПА от дна водоема. Контур системы управления формирует заданный дифферент аппарата для погружения или всплытия АНПА.

Перед включением программного режима «Выход в точку» оператор задает координаты точки назначения и маршевую скорость АНПА. При включении режима АНПА движется к заданной точке, используя алгоритм наведения. Если при работе данного алгоритма аппарат попадает в зону переключения режима, имеющую вид круга с центром в заданной точке, то он переходит в автоматизированный режим, при этом маршевая скорость сбрасывается.

Программный режим «Движение по траектории» реализует движение АНПА по заданной траектории, которая определяется оператором как последовательность точек. Режим представляет собой движение аппарата по точкам траектории. При достижении зоны переключения режима очередной точки АНПА наводится на следующую точку траектории. Если достигнута зона переключения последней точки, то аппарат переходит в автоматизированный режим, при этом маршевая скорость сбрасывается.

Для упрощения разработки и отладки программных режимов движения АНПА была создана математическая модель, позволяющая в полной мере изучить поведение аппарата в различных условиях. Работа модели основана на решении дифференциальных уравнений движения аппарата методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Уравнения динамики АНПА имеют следующий вид [2]:

$$\begin{aligned}
 m_x \frac{dv_x}{dt} &= F_{dx} + F_{cx} + P_x, \\
 m_y \frac{dv_y}{dt} &= F_{cy} + P_y, \\
 m_z \frac{dv_z}{dt} &= F_{cz} + P_z, \\
 I_{xx} \frac{d\omega_x}{dt} &= M_{dx} + M_{ax} + M_{cx}, \\
 I_{yy} \frac{d\omega_y}{dt} &= M_{dy} + M_{cy}, \\
 I_{zz} \frac{d\omega_z}{dt} &= M_{dz} + M_{az} + M_{cz},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где m_x, m_y, m_z – масса аппарата с учетом присоединенных масс; v_x, v_y, v_z – проекции скорости аппарата на оси связанной системы координат (СК); F_{dx} – проекция сил тяги двигателей на продольную ось аппарата; F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} – проекции гидродинамических сил на оси связанной СК; P_x, P_y, P_z – проекции суммы силы Архимеда и силы тяжести; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – главные моменты инерции АНПА; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости АНПА относительно осей связанной СК; M_{dx}, M_{dy}, M_{dz} – проекции момента, создаваемого двигателями; M_{ax}, M_{az} – проекции момента, создаваемого силой Архимеда; M_{cx}, M_{cy}, M_{cz} – проекции гидродинамического момента. Моменты в (1) рассчитаны относительно центра масс АНПА.

Путем интегрирования данных уравнений получаем проекции линейной и угловой скоростей АНПА на оси связанной СК.

Следующим шагом расчета является преобразование скоростей. Линейные скорости АНПА преобразуются из связанной в местную географическую СК посредством матрицы направляющих косинусов:

$$\begin{pmatrix} v_{xg} \\ v_{yg} \\ v_{zg} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix},$$

где v_{xg}, v_{yg}, v_{zg} – проекции скорости АНПА на оси местной географической СК, α_{ij} – элементы матрицы.

Также на данном шаге вычисляются производные углов ориентации АНПА по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \omega_y \sin(\gamma) + \omega_z \cos(\gamma), \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_x - \operatorname{tg}(\theta)(\omega_y \cos(\gamma) - \omega_z \sin(\gamma)), \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{1}{\cos(\theta)}(\omega_y \cos(\gamma) - \omega_z \sin(\gamma)),\end{aligned}$$

где θ, γ, ψ – углы дифферента, крена и курса АНПА.

Интегрируя уравнения для скоростей, получаем значения углов ориентации аппарата и координаты аппарата в местной географической системе координат.

АНПА имеет 4 движителя, формирующих силы тяги в направлении продольной оси аппарата. Величины $F_{dx}, M_{dx}, M_{dy}, M_{dz}$ из (1) вычисляются по значениям сил тяги движителей:

$$\begin{aligned}F_{dx} &= F_{мвп_x} + F_{мнл_x} + F_{мвл_x} + F_{мнп_x}, \\ M_{dx} &= k_\gamma(-F_{мвп_x} - F_{мнл_x} + F_{мнп_x} + F_{мвл_x}), \\ M_{dy} &= l_2(-F_{мвп_x} + F_{мвл_x} + F_{мнл_x} - F_{мнп_x}), \\ M_{dz} &= l_1(-F_{мвп_x} - F_{мвл_x} + F_{мнл_x} + F_{мнп_x}),\end{aligned}$$

где $F_{мвп_x}, F_{мнл_x}, F_{мвл_x}, F_{мнп_x}$ – силы тяги движителей АНПА; k_γ – коэффициент пропорциональности; l_2 и l_1 – расстояния от линии действия сил тяги движителей до горизонтальной и вертикальной осей симметрии АНПА.

Модель движителя принята в виде передаточной функции апериодического звена 1-го порядка:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{k}{Tp+1},$$

где k, T – коэффициент усиления и постоянная времени движителя.

Таким образом, формирование сил тяги движителей происходит согласно следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned}T \frac{dF_{мвп_x}}{dt} + F_{мвп_x} &= kU_{мвп}, \\ T \frac{dF_{мнп_x}}{dt} + F_{мнп_x} &= -kU_{мнп}, \\ T \frac{dF_{мвл_x}}{dt} + F_{мвл_x} &= -kU_{мвл}, \\ T \frac{dF_{мнл_x}}{dt} + F_{мнл_x} &= kU_{мнл},\end{aligned}$$

где $U_{мвп}, U_{мнп}, U_{мвл}, U_{мнл}$ – управляющие сигналы для соответствующих движителей АНПА. Знак «минус» отражает различное направление вращения винтов движителей.

Управляющие сигналы для двигателей АНПА формируются БФС ДРК согласно следующим уравнениям:

$$U_{мвл} = -U_x - U_\psi + U_\theta - U_\gamma,$$

$$U_{млн} = U_x + U_\psi + U_\theta - U_\gamma,$$

$$U_{мвп} = U_x - U_\psi - U_\theta - U_\gamma,$$

$$U_{мпн} = -U_x + U_\psi + U_\theta - U_\gamma,$$

где U_x – управляющий сигнал по каналу марша; U_ψ – управляющий сигнал по каналу курса; U_θ – управляющий сигнал по каналу дифферента; U_γ – управляющий сигнал по каналу крена. Структурная схема БФС ДРК представлена на рис. 6.

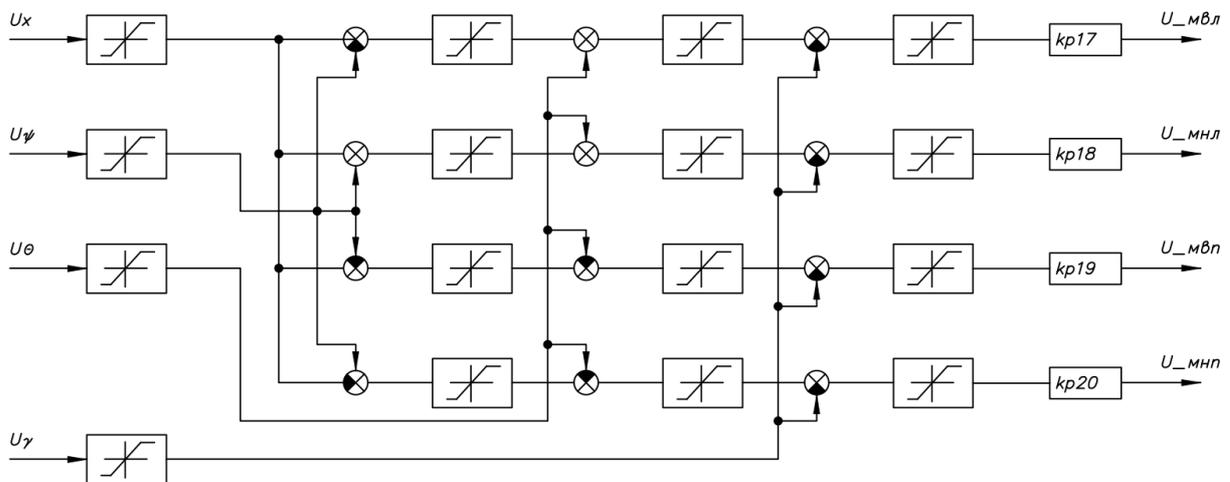


Рис. 6. Структурная схема БФС ДРК

В БФС ДРК предусмотрено ограничение уровня сигнала после каждого суммирования для предотвращения насыщения по какому-либо из каналов управления.

Поскольку реализация режимов работы АНПА требует управления углами курса, крена и дифферента, в СУ АНПА предусмотрены контуры удержания соответствующих углов. В качестве примера на рис. 7 показан фрагмент типовой структурной схемы контура управления курсом аппарата.

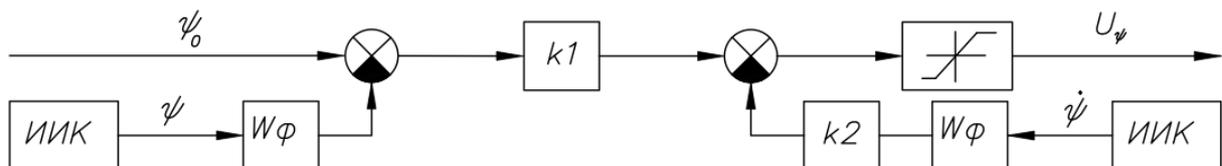


Рис. 7. Структурная схема фрагмента контура управления курсом АНПА

В программных режимах работы АНПА использовались два метода наведения: метод погони и метод наведения по линии визирования [3].

Метод погони наиболее прост в реализации. Исходными данными для него являются координаты аппарата, точки наведения, текущий курс аппарата, максимальный уровень маршевой скорости. Реализованная структурная схема алгоритма наведения по методу погони показана на рис. 8.

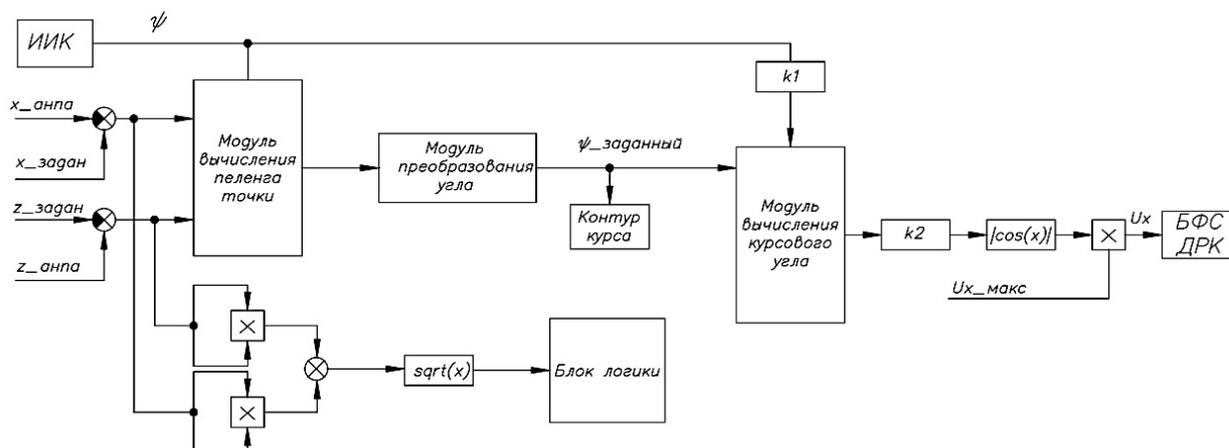


Рис. 8. Структурная схема алгоритма наведения по методу погони

Работа алгоритма заключается в следующем. Вычисляется смещение координат целевой точки относительно координат АНПА, на основании которого считается пеленг точки относительно аппарата. Пеленг преобразуется так, чтобы соответствовать числу оборотов АНПА по курсу. Полученный угол является заданным курсом и передается в систему управления АНПА.

Курсовой угол точки вычисляется как разница между заданным и текущим курсом АНПА. В зависимости от курсового угла точки формируется маршевый сигнал U_x , который подается в БФС ДРК.

Для блока логики рассчитывается расстояние до целевой точки. Блок логики срабатывает, если расстояние до точки меньше, чем некоторая заданная константа. Если алгоритм наведения используется в режиме наведения на точку, то срабатывание блока логики приводит к переводу АНПА в автоматизированный режим и сбросу маршевой скорости. Если алгоритм наведения используется в режиме движения по траектории, то оно приводит к наведению на следующую точку траектории. В случае, если достигнута последняя точка траектории, АНПА переключается в автоматизированный режим и сбрасывается маршевая скорость.

Траектория движения АНПА при использовании наведения по методу погони при отсутствии течения представлена на рис. 9.

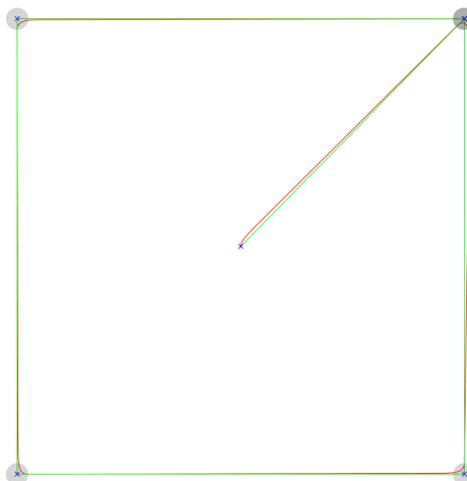


Рис. 9. Результат работы алгоритма наведения по методу погони

Недостатком наведения по методу погони является отклонение траектории от прямолинейной при наличии течения. На рис. 10 изображена траектория АНПА при наличии течения со скоростью 0,4 м/с, направленного на северо-восток.

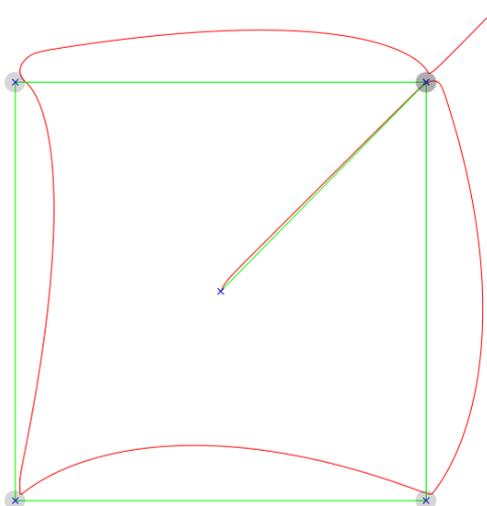


Рис. 10. Траектория АНПА при наведении по методу погони при наличии течения

Алгоритм наведения по линии визирования более сложен, однако позволяет лучше обрабатывать прямолинейную траекторию движения. Для данного алгоритма, в отличие от предыдущего, требуются координаты двух точек траектории. На основании координат точек считается угол пеленга конечной точки относительно начальной α_0 . Также

считается угол пеленга конечной точки относительно аппарата α . Ошибка по курсу аппарата вычисляется по формуле:

$$\Delta\Psi = k(\alpha_0 - \alpha),$$

где k – настроечный коэффициент.

Также предусмотрено ограничение ошибки по модулю, так как она не может превышать 90° .

Структурная схема алгоритма показана на рис. 11.

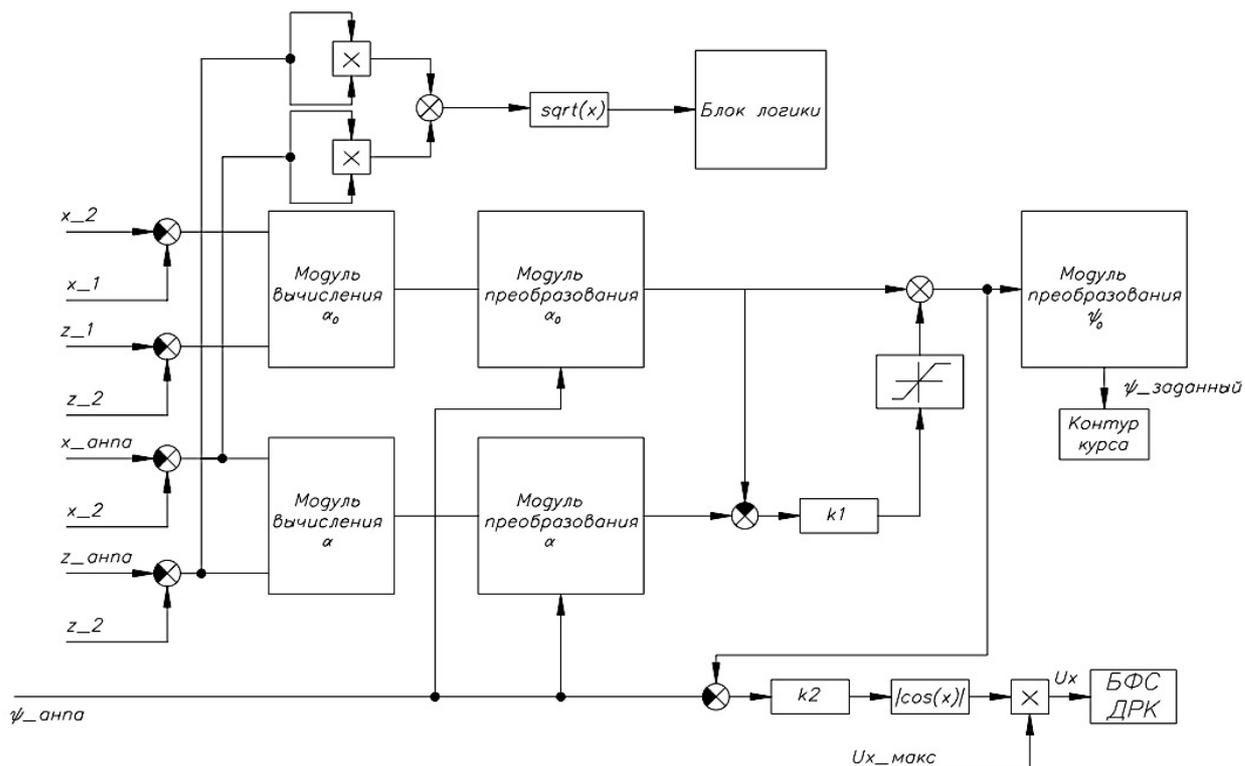


Рис. 11. Структурная схема алгоритма наведения по линии визирования

Алгоритм расчета маршевой скорости и алгоритм работы блока логики аналогичны предыдущему методу наведения.

Траектория АНПА при отсутствии течения и применении данного метода наведения показана на рис. 12.

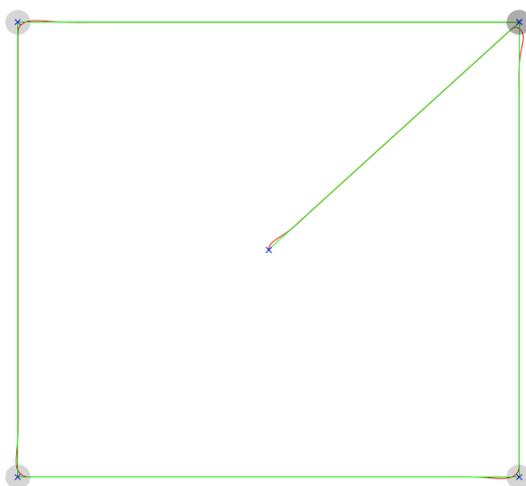


Рис. 12. Результат работы алгоритма наведения по линии визирования при отсутствии течения

Существенная разница между двумя алгоритмами наведения видна при наличии течения. Использование данного алгоритма наведения приводит к более точной отработке прямолинейной траектории. Траектория аппарата при наличии течения показана на рис. 13.

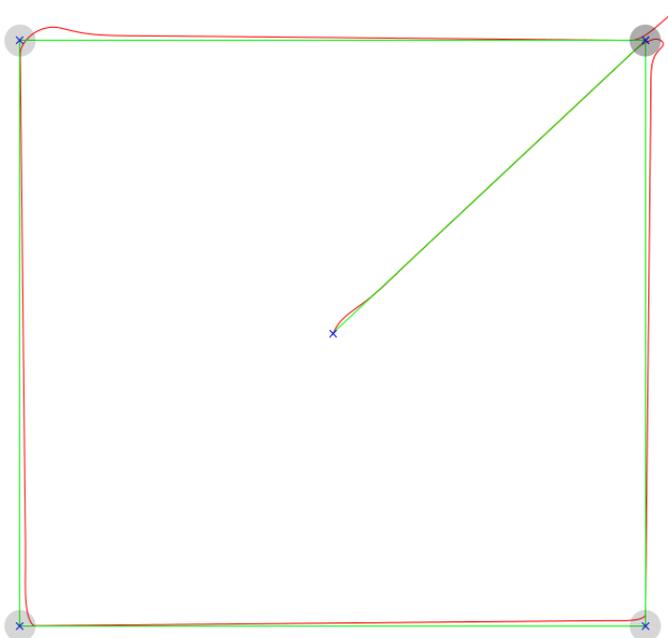


Рис. 13. Результат работы алгоритма наведения по линии визирования при наличии течения

Полученные результаты подтвердили корректность реализации и работы алгоритмов ИУС в составе АНПА. Программные режимы работы реальной системы управления АНПА полностью построены на данных алгоритмах.

В настоящее время ведется подготовка АНПА к отработке в бассейне и на озере.

Список литературы

1. Крючков Р.С., Егоров С.А. Организация движения группы автономных необитаемых подводных аппаратов при проведении противоминных действий // Технические проблемы освоения мирового океана: 5-я всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана»: материалы. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2013. С.409-413.
2. Грумондз В.Т., Половинкин В.В., Яковлев Г.А. Теория движения двухсредных аппаратов. Математические модели и методы исследования. М.: Вузовская книга, 2012. 643 с.
3. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Л.В. Высокоточные системы самонаведения. Расчет и проектирование. Вычислительный эксперимент. М.: Физматлит, 2011. 511 с.