

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СУДНА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО РАБОТУ АНПА

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, Д.В. Копылов

В статье решается задача обеспечения устойчивой гидроакустической связи между автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) и обеспечивающим его работу судном сопровождения или безэкипажным катером в процессе выполнения этим аппаратом подводных миссий в условиях открытого моря с использованием гидроакустической системы связи и навигации с ультракороткой базой. Известные подходы к позиционированию судна относительно движущегося по произвольному маршруту АНПА часто приводят к ухудшению качества связи или ее потере из-за увеличения расстояния до аппарата и роста собственных шумов судна. Для решения этой проблемы предложен метод формирования программных сигналов управления для позиционирования судна на основе модельно-предиктивного управления. Этот метод позволяет вычислять скорость и курс судна с учётом фактической и прогнозируемой траекторий АНПА, динамических характеристик этого судна и физических параметров гидроакустического канала связи. С целью максимизации отношения сигнал/шум (ОСШ), которое учитывает потери на распространение сигнала, уровень собственных шумов судна и помех моря, формируется целевая функция оптимизации. Для прогноза вектора состояния судна используется его динамическая модель с уравнением рыскания Номото. Задача оптимизации решается на каждом шаге вычислений с помощью квадратичного программирования в среде MATLAB. Проведено численное моделирование для траектории движения АНПА в виде последовательных галсов. Сравнение с двумя альтернативными подходами показало, что разработанный метод обеспечивает стабильно высокий уровень ОСШ, отсутствие потерь связи при минимально возможных перемещениях судна. Результаты исследований подтвердили эффективность предложенного метода для поддержания надёжного гидроакустического канала связи с АНПА, перемещающегося по протяженным морским полигонам.

Ключевые слова: гидроакустический канал связи, отношение сигнал/шум, моделирующее предиктивное управление, судно сопровождения, автономный необитаемый подводный аппарат, оптимизация траектории, гидроакустическая система связи и навигации с ультракороткой базой.

Введение

Эффективность проведения подводных операций с применением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в условиях открытого моря во многом зависит от качества и надёжности гидроакустической связи между аппаратом и судном сопровождения, посредством которой передается телеметрия от АНПА и корректируются его миссии путем отправки команд по каналу связи. В большинстве случаев для таких работ АНПА оснащается гидроакустической системой связи и навигации с ультракороткой базой (ГАСНС УКБ), качество работы которой сильно за-

висит от внешних условий, шумовой обстановки, а также дистанции между АНПА и судном сопровождения. При этом рабочая зона действия системы, в которой АНПА должен находиться для обеспечения стабильной связи с судном, характеризуется техническими характеристиками ГАСНС УКБ, к которым относятся дальность связи и угол раскрытия антенны (рис. 1, а) [1, 2].

В реальных условиях глубоководных экспедиций при выполнении поисковых, инспекционных и технологических операций [3–5] маршрут и режимы движения АНПА задаются заранее, но они часто могут изменяться в процессе выполнения миссии при

обходе препятствий, движении вблизи идентифицируемого протяженного объекта, а также в случае остановок для дообследования целевого объекта и выполнения манипуляционных работ. Поэтому для обеспечения устойчивого канала связи с АНПА посредством ГАСНС УКБ необходимо согласованно перемещать судно сопровождения или безэкипажный катер (БЭК) вслед за аппаратом.

Наиболее распространенным подходом к организации совместной работы является позиционирование судна в центральной точке обследуемого полигона [6]. Данный подход предполагает, что дальности действия гидроакустического канала достаточно для покрытия всего полигона работ АНПА. Однако на практике это допущение зачастую является ошибочным, что приводит к значительному ухудшению или полной потере связи на периферийных участках маршрута. Такие ситуации возникали при выполнении экспедиционных работ с АНПА ММТ-3500. В частности, на рис. 1, б показан участок траектории движения АНПА, на котором аппарат покинул зону действия ГАСНС УКБ и прошел дистанцию около 200 метров, не имея связи с оператором и навигационной привязки, что могло привести к аварийной ситуации. В таких случаях оператор АНПА, основываясь на своем опыте, оценивает приближение аппарата к границам зоны действия ГАСНС УКБ и выдает команды судоводителям для перемещения судна.

Альтернативный подход, предполагающий движение судна по траектории, повторяющей маршрут АНПА [7], также обладает существенными недостатками. Несмотря на кажущуюся простоту реализации, данный подход является энергетически неэффективным. При этом ключевой проблемой является генерация самим судном сопровождения значительных подводных шумов при движении. Шумы работаю-

щих двигателей, винтов и вспомогательных систем создают существенные помехи в рабочей полосе частот гидроакустического канала, что приводит к значительному снижению отношения сигнал/шум (ОСШ) и, как следствие, к ухудшению качества связи и надежности передачи данных.

Поэтому в настоящее время все еще остается нерешенной проблема снижения качества или полная потеря связи с АНПА, перемещающимися по протяженным морским полигонам.

1. Постановка задачи

Для решения вышеуказанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, который позволит формировать программные сигналы управления для позиционирования судна сопровождения или БЭК с учетом текущей и прогнозируемой траекторий АНПА, динамических характеристик судна и параметров гидроакустического канала связи с целью обеспечения стабильной связи с этим аппаратом.

Чтобы спрогнозировать перемещения судна и качество канала связи в будущем временном интервале, а затем оптимизировать программные сигналы управления с целью максимизации ОСШ на протяжении всей траектории движения АНПА с учётом ограничений, необходимо использовать методологию модельно-предиктивного управления [8, 9]. Указанные вычисления, как показано на рис. 2, должны выполняться на основе информации о положении судна и АНПА, характеристик ГАСНС УКБ, а также динамических характеристик судна, описывающих его инерционность и ограничения на управление. На основе этих данных должна решаться задача максимизации суммарного ОСШ на конечном горизонте прогнозирования, используя динамическую модель

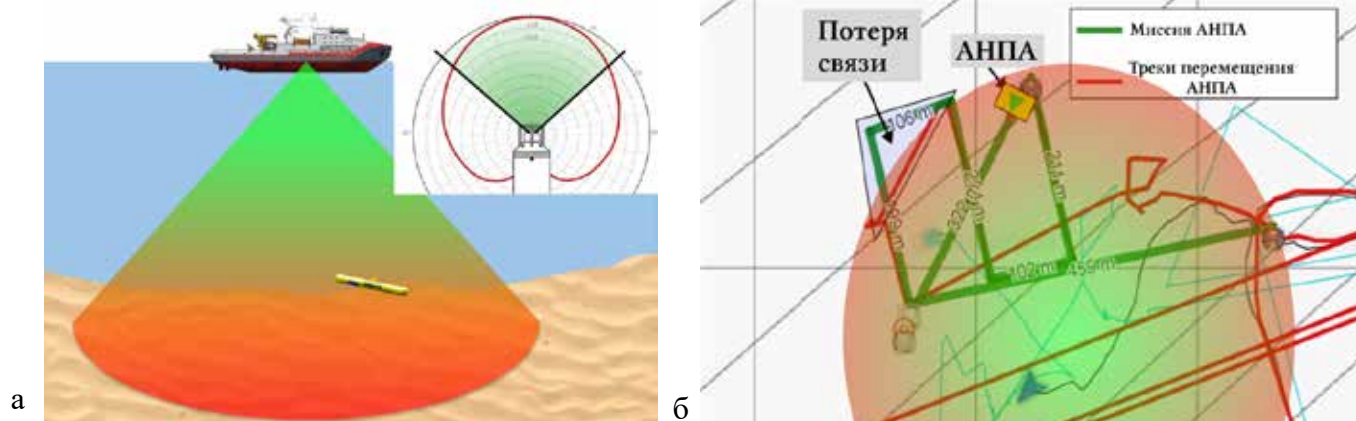


Рис. 1. Работа АНПА с ГАСНС УКБ: а – зона действия ГАСНС УКБ, б – треки перемещений АНПА ММТ-3500 при выполнении экспедиционных работ

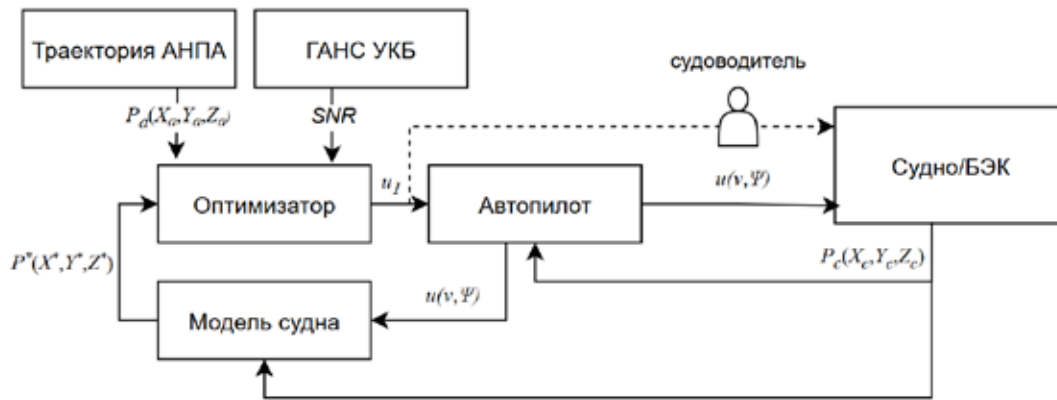


Рис. 2. Структурная схема работы метода

судна для предсказания его будущих положений. Это позволит определить последовательность программных сигналов управления $u_i = [v_i, \psi_i]^T, i \in [0, \frac{T}{\Delta t}]$, где v_i и ψ_i – скорость и курс судна в момент времени $t_i \in [t_0, t_0 + \Delta t, \dots, T]$ соответственно; T – время выполнения миссии; Δt – шаг дискретизации. Затем рассчитанные программные сигналы должны передаваться судоводителю или на автопилот, а от него – на исполнительные устройства судна или БЭК. Весь расчет может быть выполнен перед выполнением миссии АНПА, а в случае изменения траектории движения аппарата или внешних условий программные сигналы управления для судна должны пересчитываться в реальном масштабе времени.

При расчетах будем использовать неподвижную прямоугольную систему координат $X_0Y_0Z_0$, которая в момент t_0 совпадает с системой координат судна XYZ , начало которой находится в центре величины судна, ось Y направлена вдоль продольной горизонтальной оси судна, ось Z – вертикально вниз, а ось X дополняет систему до правой тройки. Положение судна $P_c = [X_c, Y_c, 0]$ в каждый момент времени определяется в системе $X_0Y_0Z_0$ до начала миссии по динамической модели, а во время миссии – путем пересчёта географических координат с глобальной навигационной системы в метры относительно начальной точки. Положение АНПА $P_a = [X_a, Y_a, Z_a]$ определяется согласно заданной для него траектории движения в системе координат $X_0Y_0Z_0$ и уточняется по данным, получаемым от ГАНС УКБ.

2. Целевая функция оптимизационной задачи

При расчете программных сигналов управления важно учитывать параметры качества гидроакусти-

ческой связи. Для его оценки целесообразно использовать ОСШ, которое описывается следующим выражением [10, 11]:

$$SNR = SL - TL - NL + DI, \quad (1)$$

где SL – уровень источника; TL – потери при передаче по акустической линии связи; NL – уровень мощности шума в приемном узле; DI – показатель направленности передающей антенны.

Как следует из выражения (1), улучшение качества связи возможно за счёт минимизации TL и NL . Однако при движении судна эти параметры изменяются динамически: TL растёт с увеличением расстояния, NL зависит от скорости судна, ветра, волн и транспортной активности.

Для расчета потерь при распространении акустических сигналов в морской воде необходимо учесть затухание. Выражение потерь на распространение звука с учетом поглощения [10]:

$$TL = 20 \lg d + \alpha(f)d,$$

где d – расстояние между приемником и передатчиком; $\alpha(f)$ – коэффициент поглощения.

Для учета влияния шумовой обстановки на функционирование гидроакустической системы требуется определить уровни помех от основных их источников. Самыми значимыми здесь выступают две разновидности: шумы, порождаемые ходом судна NL_s , и помехи, вызванные гидрометеорологическими условиями NL_m . Гидродинамические шумы возникают из-за обтекания корпуса судна потоком воды и работы гребных винтов. В большинстве случаев для приближённой оценки величины шумовой помехи от движущегося судна используют эмпирическую формулу, которая является аппроксимацией серии опытных данных и приведена в работе [11]:

$$NL_s = 30 \lg(v) + 9 \lg(w) - 20 \lg(f) + 23.46,$$

где v – скорость судна, уз; w – водоизмещение судна, т; f – частота работы гидроакустического прибора, кГц.

В основном значение шумовой помехи NL_m зависит от состояния моря и скорости ветра. Количественную оценку шумовой помехи моря можно также получить, используя эмпирическую формулу акустического давления, приведенную в пособии [12]:

$$NL_m = 65.1 + 30 \lg(v_w) - 50.4 \lg(f),$$

где v_w – скорость ветра м/с.

В результате общую величину шумовой помехи можно представить суммой рассмотренных помех:

$$NL = 10 \lg(10^{\frac{NL_s}{10}} + 10^{\frac{NL_w}{10}}).$$

В результате итоговая формула ОСШ (1) с учетом шумов от судна и помех от моря будет выглядеть следующим образом:

$$SNR(v, d) = 10 \lg \left(\frac{I_t}{0.67 \cdot 10^{-18}} \right) - 20 \lg d - \alpha(f) d - 10 \lg(10^{\frac{NL_s(v)}{10}} + 10^{\frac{NL_w}{10}}) + DI,$$

где $I_t = \frac{P_t}{2\pi m z}$, P_t – мощность передачи, Вт.

Исходя из этого целевую функцию J можно представить как сумму значений $SNR(v_i, d_i)$ на протяжении всей миссии, где d_i – расстояние между судном и АНПА на i -м шаге; v_i – скорость судна. Но так как траектория АНПА на протяжении всей миссии может корректироваться в реальном времени, то целесообразно и достаточно рассчитывать программные сигналы управления на горизонте предсказания N для каждого шага расчета t_i :

$$J(u_i) = \sum_{j=i}^{i+N} SNR(v_j, d_j), \quad (2)$$

где $u_i = \begin{bmatrix} v_j & \psi_j \\ v_{j+1} & \psi_{j+1} \\ \dots & \dots \\ v_{j+N} & \psi_{j+N} \end{bmatrix}^T \in R^{2 \times N}$ – вектор управляющих

воздействий на горизонте предсказания N .

3. Формирование программных сигналов управления

На основе полученной целевой функции (2) формируется задача оптимизации, которая на каждом шаге расчета заключается в поиске такой последовательности программных сигналов управления u_i на

горизонте прогнозирования N , при которой суммарное ОСШ достигает максимума:

$$\max_u J(u) = \sum_{j=1}^{i+N} SNR(v_j, d_j).$$

Вводятся ограничения на управление

$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ и ограничение на зону связи $c(u) \leq 0$. Начальное приближение u_0 для решения оптимизационной задачи задается как последовательность из N одинаковых пар (v_0, ψ_0) , где v_0 и ψ_0 – текущие скорость и курс судна. На каждом внутреннем шаге итерационного процесса оптимизации выполняется квадратичная аппроксимация целевой функции вокруг текущего приближения u_i^k [13]:

$$J(u_i^k + p) \approx J(u_i^k) + \nabla J(u_i^k)^T p + \frac{1}{2} p^T H_k p,$$

где $\nabla J(u_i^k)$ – градиент J для u_i^k , H_k – гессиан,

$p = u_i - u_i^k$, k – номер итерации поиска решений оптимизационной задачи.

Для прогнозирования положения судна на горизонте N используется динамическая модель, учитывающая инерционность судна при отработке программных сигналов скорости и курса. Предполагается, что в реальной системе управления судном присутствует подчиненный контур автоматического управления или судоводитель, который обеспечивает отработку заданных значений v_i и ψ_i .

Математическая модель динамики судна может быть представлена системой уравнений, в которой продольное движение и поперечное смещение описываются отдельными гидродинамическими соотношениями, а движение по курсу – уравнением рыскания, описанному в модели Номото [14, 15]:

$$\begin{cases} (M + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} + (M + \lambda_{22}) v_y \omega = -R_x - P_{px} + P_e - A_x, \\ (M + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (M + \lambda_{11}) v_x \omega = -R_y - P_{py} - A_y, \\ T \frac{dr}{dt} + r = K \delta, \end{cases}$$

где M – масса судна; λ_{11} – присоединенная масса при движении по оси X; λ_{22} – присоединенная масса при движении по оси Y; v_x – проекция скорости судна на ось X; v_y – проекция скорости судна на ось Y; ω – угловая скорость судна; R_x – продольная гидродинамическая сила на корпусе; R_y – поперечная гидродинамическая сила на корпусе; P_e – полезная сила упора гребного винта; P_{px} – продольная сила давления воды на руль; P_{py} – поперечная сила руля; A_x – продольная аэродинамическая сила; A_y – по-

перечная аэродинамическая сила; T, K – постоянная времени и коэффициент передачи соответственно; δ – угол поворота пера руля (в градусах).

На следующем этапе, исходя из заданной целевой функции, установленных ограничений и начальных условий, а также с учётом принятой модели поведения объекта решается задача максимизации функционала $J(u)$. При этом нелинейные ограничения линеаризуются, и на текущей итерации исходная задача сводится к задаче квадратичного программирования:

$$\min_d (-\nabla J^T p - \frac{1}{2} p^T H p),$$

при линейных ограничениях $\nabla c^T p + c(u_i^k) \leq 0$.

Для её решения используются стандартные алгоритмы внутренней точки, реализованные в пакете Optimization Toolbox среды Matlab [16].

В результате для каждого шага t_i формируется матрица программных сигналов на весь горизонт

предсказания $u_i^k = \begin{bmatrix} v_1 & \psi_1 \\ v_2 & \psi_2 \\ \dots & \dots \\ v_N & \psi_N \end{bmatrix} \in R^{N \times 2}$. Все переменные,

число которых составляет $2N$, рассматриваются как единое пространство поиска.

После нахождения оптимальной последовательности u_i^k в качестве реального программного сигнала управления применяется только первый элемент: $v_{cur} = v_1^*, \psi_{cur} = \psi_1^*$. После отработки этого сигнала положение судна $P_c = [X_c, Y_c, 0]$ обновляется на основе динамической модели или данных системы GPS при ее наличии, после чего происходит переход к следующему шагу t_{k+1} . Горизонт прогнозирования сдвигается вперёд, в оптимизатор поступают обновлённые

данные, и вычисление новой оптимальной последовательности повторяется для следующего горизонта.

4. Численное моделирование работы метода

Для оценки эффективности функционирования разработанного метода было проведено сравнительное моделирование трёх подходов: разработанный метод, движение судна за АНПА с использованием ПИД-регулятора, движение судна по центру галсов.

Моделирование выполнялось в среде Matlab для траектории АНПА, представляющей собой последовательные галсы в прямоугольной области. Задача нелинейной оптимизации решалась с использованием пакета Optimization Toolbox [16] в среде Matlab. Учитывались физические модели потерь сигнала TL , уровня шума NL, SL принимался равным 80 дБ, на основе которых рассчитывалось ОСШ в реальном времени.

Для модели динамики судна были использованы параметры [17], приведенные в табл. 1:

Таблица 1. Параметры динамической модели судна

Параметр	$M, \text{кг}$	$\lambda_{11}, \text{кг}$	$\lambda_{22}, \text{кг}$	$T, \text{с}$	$K, 1/\text{с}$
Значения	1300	40	600	1.645	0.29

Параметры R_x, R_y, A_x, A_y рассчитывались на основе классической формулы скоростного напора, где для каждой силы подставляются соответствующие плотность среды, безразмерный коэффициент (гидро- или аэродинамический), характерная площадь и скорость набегающего потока [18].

Для каждого режима управления анализировались траектория судна, расстояние до АНПА и изменение ОСШ. Результаты визуализированы в виде карт траекторий (рис. 3). На этом рисунке: синяя пун-

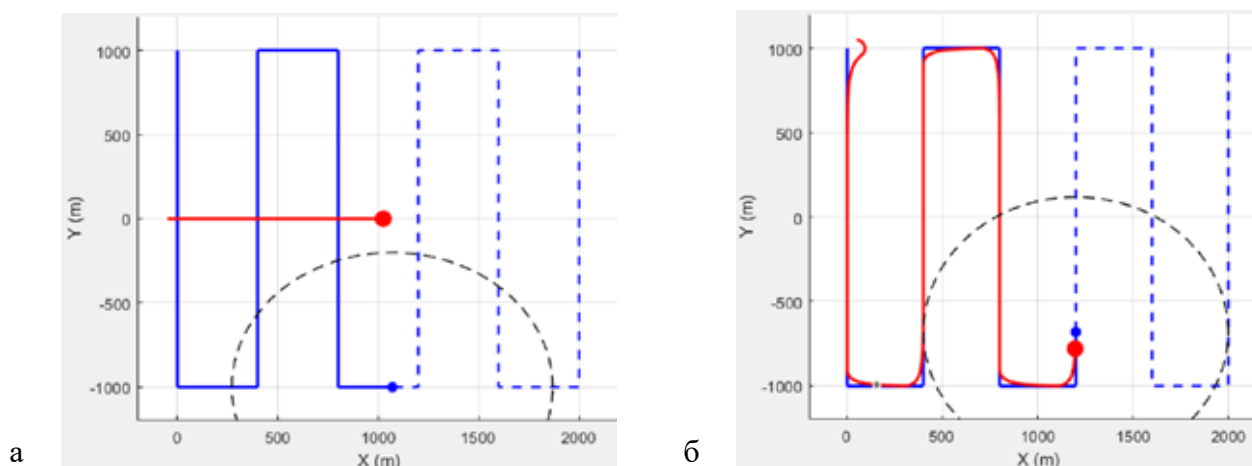


Рис. 3. Траектория судна при движении за АНПА: а – по центру галсов; б – за АНПА с использованием ПИД-регулятора

ктирная линия – заданная траектория АНПА; синяя сплошная линия – пройденная траектория АНПА; синий кружок – АНПА; красная линия – пройденная траектория судна; красный кружок – судно; черная пунктирная линия – примерная зона действия гидроакустической связи.

На рис. 3, *а* показаны результаты использования подхода, при котором судно сопровождения перемещается строго по оси X вслед за АНПА. Такой подход изначально предполагает, что АНПА будет удаляться от судна при движении аппарата по оси Y . Как следствие, расстояние между судном и АНПА достигает максимальных значений на поворотных участках галсов, что приводит к резкому росту TL при передаче. В отличие от этого, применение ПИД-регулятора (рис. 3, *б*) поддерживает минимальное расстояние между АНПА и судном. Однако из-за инерционности судна его реакция на изменение направления движения аппарата происходит с запаздыванием, кроме того, оно постоянно находится в движении.

Результаты численного моделирования разработанного метода формирования программных сигналов представлены на рис. 4. В ходе моделирования судно сопровождения обрабатывало рассчитанные сигналы управления, формируемые методом с учётом прогноза движения АНПА и ограничений ГАСНС УКБ. В результате судно двигалось по оптимальной траектории, имеющей максимальный показатель ОСШ, при этом заблаговременно реагировало на изменения направления движения АНПА. На некоторых участках траектории судно опережало АНПА (поворотные точки галсов), что позволяло ему часть времени находиться в дрейфе.

На представленном графике (рис. 5) приведены временные зависимости ОСШ

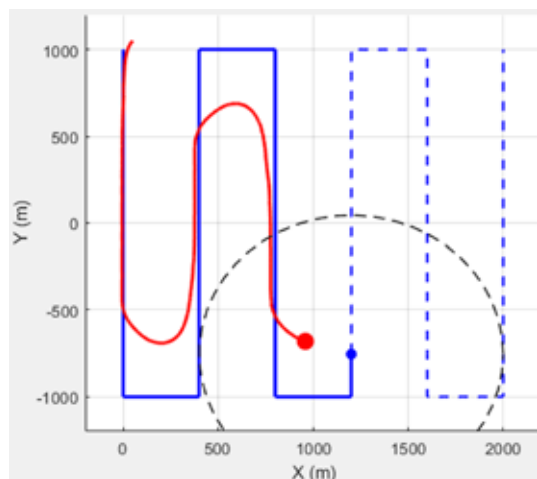


Рис. 4. Траектория судна при использовании разработанного метода

для трёх подходов. По оси абсцисс отложено время миссии (от 0 до 14 000 с), по оси ординат – текущее значение ОСШ в диапазоне от 0 до 25 дБ. Разработанный метод обеспечивает наиболее стабильный уровень сигнала, который на протяжении почти всего времени равен 15–20 дБ с редкими кратковременными снижениями, не приводящими к потере связи. Движение за АНПА показывает заметно худшие результаты, а именно среднее ОСШ составляет около 10–12 дБ, при этом наблюдаются периодические провалы ниже 5 дБ, особенно в моменты резких манёвров АНПА, что связано с запаздыванием реакции и повышенным уровнем собственных шумов судна. Самая низкая эффективность при движении судна по центру галсов. На протяжении большей части движения АНПА ОСШ опускается практически до нуля, что соответствует потере связи с АНПА. Таким образом, сравнительный анализ результатов (табл. 2) демонстрирует, что разработанный метод обеспечивает не только более высокое среднее ОСШ, но позволяет повысить среднее ОСШ на 47%.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования движения судна сопровождения

Метод	Средний ОСШ, дБ	Минимальный ОСШ, дБ	Время потери связи, с
Разработанный метод	9.9	6.4	0
ПИД-регулятор	6.7	3.8	0
Движение по центру галсов	5.6	0	2000

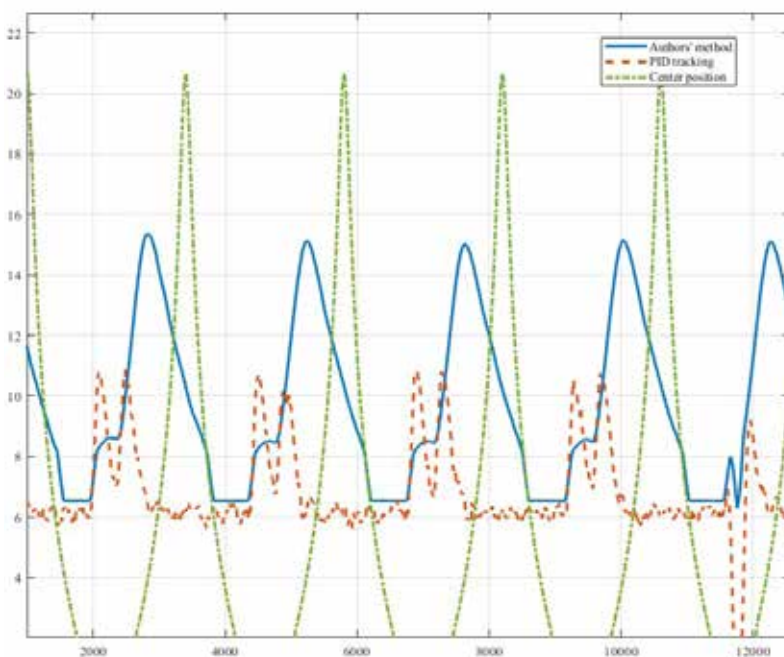


Рис. 5. Временные зависимости ОСШ

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать вывод, что разработанный метод обеспечивает наиболее высокий средний и минимальный ОСШ, а также поддерживает устойчивую связь на всех участках траектории движения АНПА, включая сложные манёвры. Использование ПИД-регулятора не способно обеспечить сопоставимое качество, а движение по центру галсов является наиболее простым, но может приводить к полной потере связи с АНПА. Важно отметить, что в предложенном методе для прогнозирования положения судна используется динамическая модель, позволяющая формировать сигналы, учитывая инерционность судна, но повышающая сложность вычислений. В случаях, когда бортовые вычислительные ресурсы ограничены или используется БЭК малого водоизмещения, допустимо применение кинематической модели, поскольку шаг дискретизации управления существенно превышает длительность переходных процессов при маневре.

Заключение

В работе предложен и реализован метод формирования программных сигналов управления для системы позиционирования судна при работе с АНПА. Показано, что учёт ОСШ для определения оптимальной скорости и курса движения судна при работе с АНПА позволяет существенно повысить качество связи по сравнению с известными подходами. Также стоит отметить, что данный метод может быть без особых изменений адаптирован для расчета иных программных сигналов управления, например, положения судна, тяги и угла поворота руля. В дальнейшем планируется экспериментальная проверка в реальных экспедиционных работах или на основе данных с уже проведенных экспедиций, а также модификация метода для работы с группой АНПА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонд № 23-71-10038-П, <https://rscf.ru/project/23-71-10038-П/>

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи // Russian Technological Journal. 2023. Т. 11, № 1. С. 31–40.
2. Evologics 4265 USBL Underwater Positioning System. URL: <https://www.irov.it/en/products/acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-4265-usbl-underwater-positioning-system/> (дата обращения: 01.06.2026).
3. Бабаев Р.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Елисеенко Г.Д., Михайлов Д.Н., Найдено Н.А. Применение АНПА ММТ-3500 для научных исследований в Атлантическом секторе Антарктики // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3. С. 41.
4. Боровик А.И., Рыбакова Е.И., Галкин С.В., Михайлов Д.Н., Коноплин А.Ю. Опыт использования автономного необитаемого подводного аппарата «ММТ-3000» для исследований бентосных сообществ Антарктики // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 1–14.
5. Chyba M., Cazzaro D., Invernizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration // 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2010. P. 139–151.
6. Jalving B., Gade K., Hagen O.K., Vestgard K. A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system // Oceans 2003. San Diego, CA, USA, 2003. Vol. 2. P. 1146–1153.
7. Pascoal A. et al. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence, RI, USA, 2000. Vol. 1. P. 409–415.
8. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Madison, WI, USA : Nob Hill Publishing, 2017.
9. Grüne L., Pannek J. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. 2nd ed. London, UK : Springer, 2017.
10. Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. Fundamentals of ocean acoustics. New York, NY : Springer, 2003.
11. Urlick R.J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York, NY : McGraw Hill, 1983.
12. Евтютов А.П., Колесников А.Е. Справочник по гидроакустике. Л. : Судостроение, 1982. 344 с.
13. Murty K.G., Yu F.T. Linear complementarity, linear and nonlinear programming. Berlin : Heldermann, 1988.
14. Васильев А.В. Управляемость судов. Л. : Судостроение, 1989. 328 с.
15. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ship // Journal of Zosen Kiokai. 1956. Vol. 1956. No. 99. P. 75–82.
16. MATLAB Optimization Toolbox™ User's Guide. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/> (дата обращения: 01.06.2026).
17. Дыда А.А., Плещинский К.Н., Пушкарев И.И. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12. №. 4. С. 716–725.
18. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Л. : Судостроение, 1973. 512 с.

Сведения об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, д.т.н., ведущий научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Тел. (раб.): +7(423)2432416

E-mail: konoplin@marine.febras.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

ЮРМАНОВ Александр Павлович, научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными манипуляторами, информационно-управляющие системы, супервизорное управление, интеллектуальные системы

Тел. (раб.): 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

КОПЫЛОВ Денис Владимирович, научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, математические модели динамических систем

Тел. (раб.): 89996147161

E-mail: kopylov.dvl@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5725-8260

METHOD FOR GENERATING PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR THE POSITIONING OF A VESSEL SUPPORTING AUV OPERATIONS

A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, D.V. Kopylov

This paper addresses the problem of ensuring stable hydroacoustic communication between an autonomous underwater vehicle (AUV) and support vessel or unmanned surface vessel (USV) supporting its operation during the AUV's underwater missions in open sea conditions using an ultra-short baseline hydroacoustic communication and navigation system. Existing approaches to positioning the vessel relative to an AUV moving along an arbitrary route often lead to degradation or loss of communication due to increasing distance to the vehicle and growing vessel self-noise. To solve this problem, a method for generating program control signals for vessel positioning based on model predictive control is proposed. This method computes the vessel's speed and yaw into account the actual and predicted AUV trajectories, the vessel's dynamic characteristics, and the physical parameters of the hydroacoustic communication channel. In order to maximize the signal-to-noise ratio (SNR), which accounts for signal propagation loss, vessel self-noise level, and sea ambient noise, an optimization objective function is formulated. The vessel's state vector is predicted using its dynamic model incorporating the Nomoto yaw equation. The optimization problem is solved at each computation step by means of quadratic programming in the MATLAB environment. Numerical simulations were performed for an AUV trajectory consisting of successive tacks. Comparison with two alternative approaches demonstrated that the developed method ensures a consistently high SNR level, absence of communication loss, and minimal necessary vessel movements. The research findings confirmed the effectiveness of the proposed method for maintaining a reliable hydroacoustic communication channel with an AUV operating over extended sea areas.

Keywords: hydroacoustic communication channel, signal-to-noise ratio, predictive control modeling, carrier vessel, autonomous underwater vehicle, trajectory optimization, ultra-short baseline hydroacoustic communication and navigation system.

References

1. Denisov V.E. Propusknaya sposobnost' gidroakusticheskogo kanala svyazi // Russian Technological Journal. 2023. Vol. 11. № 1. P. 31–40.
2. Evologics 4265 USBL Underwater Positioning System. URL: <https://www.irov.it/en/products/acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-acoustic-modems-and-usbl-underwater-positioning-systems/evologics-4265-usbl-underwater-positioning-system/> (date of access: 01.06.2026).
3. Babaev R.A., Borovik A.I., Vaulin Yu.V., Eliseenko G.D., Mikhajlov D.N., Najdenko N.A. Primenenie ANPA MMT-3500 dlya nauchnykh issledovaniy v Atlanticheskom sektore Antarktiki // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2022. № 3. P. 41.
4. Borovik A.I., Rybakova E.I., Galkin S.V., Mikhajlov D.N., Konoplin A.Yu. Opyt ispol'zovaniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata «MMT-3000» dlya issledovaniy bentosnykh soobshchestv Antarktiki // Okeanologiya. 2022. Vol. 62. № 5. P. 1–14.
5. Chyba M., Cazzaro D., Invernizzi L., Andonian M. Trajectory Design for Autonomous Underwater Vehicles for Basin Exploration // 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2010. P. 139–151.
6. Jalving B., Gade K., Hagen O.K., Vestgard K. A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system // Oceans 2003. San Diego, CA, USA, 2003. Vol. 2. P. 1146–1153.
7. Pascoal A. et al. Robotic ocean vehicles for marine science applications: the European ASIMOV project // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Providence, RI, USA, 2000. Vol. 1. P. 409–415.
8. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Madison, WI, USA : Nob Hill Publishing, 2017.
9. Grüne L., Pannek J. Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms. 2nd ed. London, UK : Springer, 2017.
10. Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. Fundamentals of ocean acoustics. New York, NY : Springer, 2003.
11. Urlick R.J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York, NY : McGraw Hill, 1983.
12. Evtyutov A.P., Kolesnikov A.E. Spravochnik po gidroakustike. L. : Sudostroenie, 1982. 344 c.
13. Murty K.G., Yu F.T. Linear complementarity, linear and nonlinear programming. Berlin : Heldermann, 1988.
14. Vasil'ev A.V. Upravlyaemost' sudov. L. : Sudostroenie, 1989. 328 p.
15. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ship // Journal of Zosen Kiokai. 1956. Vol. 1956. No. 99. P. 75–82.
16. MATLAB Optimization Toolbox™ User's Guide. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/> (date of access: 01.06.2026).

17. Dyda A.A., Plyasheshnik K.N., Pushkarev I.I. Postroenie modeli dinamiki bezekipazhnogo sudna po kursu na osnove eksperimental'nyh dannyh // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala SO Makarova. 2020. Vol. 12. No. 4. P. 716-725.

18. Vojtkunskij Ya.I. Spravochnik po teorii korablya. L. : Sudostroenie, 1973. 512 p.

Information about the authors

KONOPLIN Aleksandr Yurievich, Doctor of Technical Sciences, leading researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, adaptive control, information and control systems

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: +7(423)2432416

E-mail: konoplin@marine.febras.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater manipulators, information and control systems, supervisory control, intelligent systems

Phone: 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

KOPYLOV Denis Vladimirovich, researcher

Job: Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of RAS;

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Research interests: automatic control of underwater robots and manipulators, mathematical models of dynamic systems

Phone: 89996147161

E-mail: kopylov.dvl@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5725-8260



Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P., Kopylov D.V. METHOD FOR GENERATING PROGRAM CONTROL SIGNALS FOR THE POSITIONING OF A VESSEL SUPPORTING AUV OPERATIONS. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 59–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_07. EDN: IPFLVU.

