

УДК 626
EDN: IAYFLY

А. И. МАШОШИН, И. В. ПАШКЕВИЧ

АЛГОРИТМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ПРОЦЕССЕ ПРИВЕДЕНИЯ И ПРИЧАЛИВАНИЯ К ПОДВОДНОМУ ПРИЧАЛЬНОМУ УСТРОЙСТВУ

В статье описываются алгоритмы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), применяемые на всем маршруте его приведения и причаливания к подводному причальному устройству. Маршрут состоит из нескольких этапов. На каждом из них реализуются различные методы позиционирования АНПА с использованием стандартного набора оборудования, которым оснащаются современные аппараты тяжелого класса. Оцениваются погрешности определения местоположения на каждом этапе, а также время решения задачи позиционирования на бортовом вычислителе АНПА.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, подводное причальное устройство, алгоритмы позиционирования.

Введение

АНПА являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана. Наиболее актуально их применение на больших и малых глубинах, недостижимых для подводных лодок, и в труднодоступных районах, в частности подо льдом.

Обладая ограниченным запасом электроэнергии, АНПА нуждаются в периодическом его пополнении. В тех случаях, когда аппарат предназначен для многократных миссий в пределах одной акватории, например мониторинга подводной обстановки, поиска затонувших кораблей и самолетов или обслуживания сети донных станций различного назначения, оборудуются специальные подводные причальные устройства (ППУ). При стыковке с ними АНПА пополняет запас электроэнергии и обменивается информацией с пунктом управления [1, 2]. Источником энергии для ППУ может служить аккумуляторная батарея (АБ) большой емкости либо электростанция на берегу или на судне. От нее электроэнергия поступает на ППУ по подводному кабелю. ППУ с АБ может устанавливаться на любой глубине. Кроме оборудования для зарядки АБ, ППУ оснащаются набором сервисного оборудования, обеспечивающего приведение к ним АНПА, а также причаливание и удержание аппарата в статическом положении в процессе зарядки. Различные варианты конструкции ППУ, набора сервисного оборудования и способы зарядки подробно описаны в [1, 2].

Машошин Андрей Иванович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра «Интегрированные системы освещения обстановки», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Пашкевич Иван Владимирович. Главный специалист по разработке гидроакустики АНПА, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

В [3] рассматривается ППУ, источником энергии для которого служит волновой генератор в виде качающейся на поверхности моря платформы, где установлено устройство преобразования энергии качки в электрический ток, поступающий по кабелю на ППУ и накапливающийся там в АБ большой емкости.

Поскольку радиус действия АНПА ограничен запасом электроэнергии, при проведении работ в удаленном районе они доставляются туда на специальных надводных либо подводных носителях, в результате чего возникает необходимость вывести аппарат из носителя и возвратить обратно. Наиболее сложной является задача подвести АНПА к подводному носителю, поскольку это может происходить подо льдом. В таком случае подводный носитель можно рассматривать как разновидность ППУ.

В [4] предложено заряжать АБ с помощью телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) по принципу дозаправки самолетов в воздухе. АНПА подходит к надводному судну-заправщику и подает сигнал о своем прибытии. От судна отделяется ТНПА, буксирующий силовой электрический кабель. Под управлением оператора на судне ТНПА приближается к АНПА, ориентируясь по данным гидроакустического маяка, установленного на АНПА, и телекамеры, подсоединяет кабель к специальному разъему, после чего начинается зарядка АБ. После завершения зарядки ТНПА отсоединяет кабель и возвращается на судно.

Приведение и причаливание к ППУ требует высокоточного позиционирования АНПА относительно ППУ, а также высокоточного управления движительно-рулевым комплексом. В настоящей работе рассматриваются только методы и алгоритмы позиционирования АНПА в процессе приведения и причаливания к ППУ. Этому вопросу посвящено большое количество зарубежных и отечественных публикаций, например [5–13], из анализа которых можно сделать следующие выводы.

1. Для позиционирования АНПА в процессе приведения и причаливания к ППУ применяются гидроакустические, оптические и электромагнитные средства и реализуемые с их помощью методы позиционирования. Каждое из средств имеет свои достоинства и недостатки. В частности, гидроакустические средства обеспечивают позиционирование АНПА в широком диапазоне расстояний от ППУ кроме предельно малых (единицы и доли метров). Оптические средства обладают высокой точностью на расстояниях от 10 до долей метра. Электромагнитные средства обеспечивают позиционирование на сверхмалых дистанциях, в том числе внутри ППУ, если его конструкция предусматривает зарядку батареи АНПА внутри самого устройства [1, 2].
2. Поскольку точность позиционирования зависит от дистанции, процесс приведения и причаливания АНПА к ППУ разбивается на несколько этапов (как правило, на 3), на каждом из которых местоположение определяется с использованием различных средств и методов либо их комбинации.

В работе представлены:

- описание алгоритмов, реализуемых на всем маршруте приведения и причаливания к ППУ с использованием стандартного набора аппаратуры, которой оснащаются АНПА тяжелого класса;
- оценка достижимой точности позиционирования на каждом этапе приведения и причаливания;
- оценка возможности реализации алгоритмов на бортовом вычислителе.

1. Постановка задачи

ППУ представляет собой горизонтально установленную на дне площадку, к которой АНПА причаливает путем вертикального погружения на ровном киле в строго определенной ориентации по курсу (рис. 1). Такая конструкция ППУ наиболее проста и экономична, однако требует высокой точности позиционирования АНПА на заключительном этапе причаливания [2].

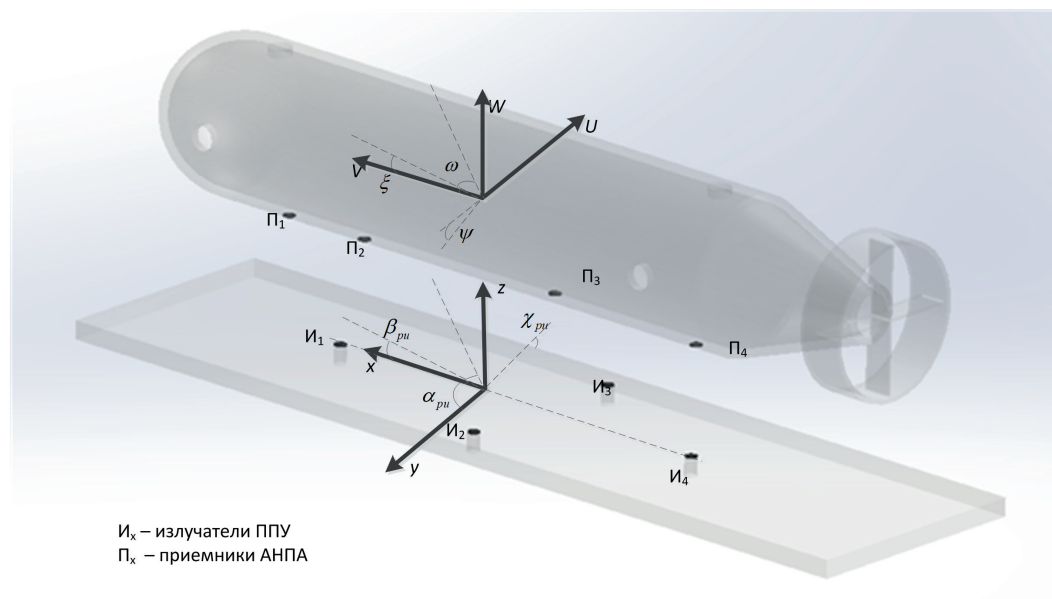


Рис. 1. Схема позиционирования АНПА относительно ППУ

Задача формулируется следующим образом: требуется причалить АНПА к ППУ путем посадки сверху так, чтобы (рис. 1):

- 1) горизонтальная проекция условного центра АНПА совпала с заданной точностью с горизонтальной проекцией условного центра ППУ;
- 2) диаметральной плоскость АНПА совпала с заданной точностью с диаметральной плоскостью ППУ;
- 3) углы ориентации АНПА по крену и дифференту совпали с заданной точностью с углами крена и дифферента ППУ при его размещении на дне.

Процесс причаливания состоит из 3-х этапов:

- 1) сближение АНПА с ППУ на расстояние в десятки метров;
- 2) маневрирование, чтобы занять позицию над ППУ и быть готовым к причаливанию;
- 3) собственно причаливание.

Будем считать, что система управления АНПА подает верные команды движительно-рулевому комплексу, а последний правильно их обрабатывает. В таком случае успешность причаливания зависит только от точности позиционирования АНПА относительно ППУ.

Предположим, что АНПА оборудован следующим стандартным набором технических средств:

- 1) движительно-рулевым комплексом, оснащенным кормовой винторулевой группой, а также горизонтальными и вертикальными подруливающими устройствами

ми, позволяющими АНПА разворачиваться на месте и вертикально всплывать/погружаться;

- 2) средствами навигации, включающими инерциальную навигационную систему, измеритель скорости, эхолот и измеритель глубины погружения;
- 3) станцией гидроакустической связи с режимом опознавания, обеспечивающим инициализацию информационного взаимодействия с ППУ и определение расстояния между АНПА и ППУ методом «запрос–ответ»;
- 4) станцией обнаружения гидролокационных сигналов (ОГС), что позволяет определять пеленги ППУ по ответному сигналу режима опознавания;
- 5) группой из не менее 4-х ненаправленных приемников, расположенных вдоль и поперек днища АНПА и обеспечивающих при приеме высокочастотных сигналов, излучаемых ППУ, определение ориентации АНПА относительно ППУ методом короткой базы [22] на дистанциях от нескольких десятков до единиц и долей метров. Чтобы обеспечить причаливание, ППУ оснащено:

- 1) станцией гидроакустической связи с режимом опознавания, оборудованной низкочастотным (десятки килогерц) приемоизлучателем и обеспечивающей запуск информационного взаимодействия с АНПА при получении сигнала запроса, а также измерение расстояния между АНПА и ППУ методом «запрос-ответ» начиная с дистанции в несколько километров;
- 2) группой из не менее 3-х высокочастотных (сотни килогерц) излучателей, максимально разнесенных вдоль и поперек основания ППУ и обеспечивающих приведение АНПА начиная с расстояния в несколько десятков метров, а также заданную ориентацию АНПА относительно ППУ.

2. Алгоритм позиционирования АНПА на первом этапе причаливания

Целью первого этапа является приведение АНПА к ППУ на дистанцию в несколько десятков метров.

После прибытия в район нахождения ППУ АНПА в режиме опознавания станции гидроакустической связи посылает сигнал запроса. Получив сигнал и установив по его параметрам легитимность источника, ППУ с известной задержкой переизлучает его. Приняв ответный сигнал, АНПА определяет расстояние до ППУ по формуле

$$R_{pu} = \frac{C_{zv} \cdot (t_{rec} - t_{iz} - \Delta t_z)}{2}, \quad (1)$$

где R_{pu} – текущее расстояние между АНПА и ППУ;

C_{zv} – скорость звука в воде на глубине АНПА;

t_{iz} – момент времени излучения сигнала запроса;

t_{rec} – момент времени получения ответного сигнала;

Δt_z – известная задержка между получением на ППУ сигнала запроса и излучением ответного сигнала.

Сигналы запроса АНПА посылает периодически, интервал составляет порядка 30 с.

Относительная среднеквадратическая погрешность (СКП) определения расстояния по формуле (1) σ_r определяется точностью знания скорости звука на глубине АНПА и точностью измерения времени обнаружения ответного сигнала и, как правило, не превышает 2% от дистанции.

Ответный сигнал также обнаруживается станцией ОГС АНПА, что позволяет измерить пеленг ППУ P_{pu} и начать движение к нему курсом, равным пеленгу. СКП определения пеленга σ_p станцией ОГС обычно не превышает 3° .

Круговая СКП определения местоположения АНПА относительно ППУ по одному ответному сигналу вычисляется по формуле [14]

$$\sigma_{circ}^2 = \sigma_r^2 + R^2 \cdot \sigma_p^2 \quad (2)$$

и в нашем случае составляет 5,6% от дистанции до ППУ.

Чтобы повысить точность определения пеленга ППУ и координат АНПА относительно ППУ, последовательность оценок пеленгов и дистанций, полученных по ответным сигналам, сглаживается одним из известных методов.

Описанным способом АНПА движется, пока не достигает расстояния в несколько десятков метров от ППУ, на котором установленные на аппарате высокочастотные приемники обнаруживают сигналы высокочастотных излучателей ППУ.

В работе [6] описан и экспериментально опробован оригинальный алгоритм приведения АНПА к ППУ, основанный только на оценке дистанции до одного излучателя, полученной по формуле (1). Однако реализация этого алгоритма требует сложного маневрирования АНПА.

3. Алгоритм позиционирования АНПА на втором этапе причаливания

Целью второго этапа является приведение АНПА в позицию над ППУ, откуда можно начать причаливание. Такой маневр требует более высокой точности позиционирования АНПА, чем способен обеспечить метод, применяемый на первом этапе. В связи с этим задействуется более точный метод короткой базы с использованием сигналов высокочастотных излучателей, расположенных на ППУ. Эти излучатели, каждый из которых имеет свой номер, начинают посылать сигналы с момента получения первого сигнала запроса. Сигналы посылаются последовательно в порядке номеров излучателей с уникальными некротными интервалами между ними, что позволяет АНПА однозначно привязывать каждый принятый сигнал к номеру излучателя даже в том случае, если параметры сигналов идентичны.

На данном этапе по сигналам высокочастотных излучателей определяются 3 координаты условного центра АНПА в декартовой системе координат ППУ, а также курс аппарата. Оценки углов крена и дифферента система управления АНПА получает от своей инерциальной навигационной системы.

Синтезируем алгоритм позиционирования АНПА относительно ППУ. Для этого введем ряд обозначений и допущений. Зададим две правые декартовы системы координат, одна из них связана с ППУ, другая – с АНПА. Начало декартовой системы координат, связанной с ППУ, совпадает с его условным центром. Взаимно перпендикулярные оси X и Y лежат в плоскости, параллельной зеркалу воды, причем ось Y лежит в диаметральной плоскости (ДП) ППУ, а ось X отвернута от оси Y на угол 90° вправо. Ось Z перпендикулярна осям X и Y и направлена вертикально вверх. Углы ориентации ППУ в этой системе координат обозначим следующим образом: α_{pu} – угол между осью Y и направлением на географический север (далее – угол ориентации ППУ); β_{pu} – угол наклона ППУ относительно плоскости X, Y вдоль ДП ППУ,

который условно будем называть дифферентом ППУ; χ_{pu} – угол наклона ППУ перпендикулярно ДП ППУ, который условно будем называть креном ППУ.

ППУ устанавливается на дно таким образом, чтобы плоскость его основания была параллельна плоскости зеркала воды (т.е. $\beta_{pu} = 0$ и $\chi_{pu} = 0$) либо имела небольшой (единицы градусов) неизвестный наклон относительно этой плоскости. Угол ориентации ППУ до начала причаливания неизвестен.

АНПА должен причалить к ППУ с курсом α_{pa} , равным углу ориентации ППУ α_{pu} . На ППУ расположены B высокочастотных излучателей с координатами b -го излучателя в декартовой системе координат X_b, Y_b, Z_b .

Декартова система координат, связанная с АНПА, имеет взаимно перпендикулярные оси U и V , которые находятся в плоскости, перпендикулярной ДП АНПА, причем ось V лежит также в ДП АНПА и направлена в нос АНПА. Ось U имеет направление по курсовому углу 90° . Ось W лежит в ДП АНПА, перпендикулярна осям U, V и направлена вверх. Начало системы координат совпадает с условным центром АНПА.

Обозначим углы ориентации АНПА в пространстве: ω – курс АНПА (угол между направлением на географический север и осью V); ξ – угол дифферента АНПА; ψ – угол крена АНПА.

Вдоль днища АНПА расположены D высокочастотных приемников, разнесенных вдоль осей U и V , с координатами d -го приемника в декартовой системе координат АНПА U_d, V_d, W_d .

Метод короткой базы, с помощью которого осуществляется позиционирование АНПА относительно ППУ, основан на измерении разности времени прихода (задержек) сигналов каждого излучателя, расположенного на ППУ, на каждую пару приемников.

Стохастическая модель оценки задержки прихода сигнала b -го излучателя на c -й и d -й приемники имеет вид

$$\hat{\tau}_{b,c,d} = \tau_{b,c,d} + \Delta\tau_{b,c,d}, \quad (3)$$

где $\hat{\tau}_{b,c,d}$ – оценка задержки прихода сигнала b -го излучателя на c -й и d -й приемники; $\tau_{b,c,d}$ – истинное значение задержки прихода сигнала b -го излучателя на c -й и d -й приемники, найденное по формуле

$$\tau_{b,c,d} = \frac{|r_{b,c} - r_{b,d}|}{C_{zv}}. \quad (4)$$

Здесь $r_{b,d}$ – расстояние между b -м излучателем и d -м приемником, зависящее от координат центра АНПА X_{pa}, Y_{pa}, Z_{pa} , углов ориентации аппарата $\alpha_{pa}, \beta_{pa}, \chi_{pa}$ и углов ориентации ППУ $\alpha_{pu}, \beta_{pu}, \chi_{pu}$ в декартовой системе координат ППУ, вычисляемое по формуле

$$r_{b,d} = \sqrt{(X_d - X_b)^2 + (Y_d - Y_b)^2 + (Z_d - Z_b)^2}. \quad (5)$$

X_b, Y_b, Z_b – координаты b -го излучателя в системе координат ППУ, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} X_b &= X'_b \cdot \cos\chi_{pu}, \\ Y_b &= Y'_b \cdot \cos\beta_{pu}, \\ Z_b &= Z'_b - X'_b \cdot \sin\chi_{pu} - Y'_b \cdot \sin\beta_{pu}. \end{aligned} \quad (6)$$

X'_b, Y'_b, Z'_b – координаты b -го излучателя в системе координат ППУ при предполагаемом на данном этапе условии, что плоскость основания ППУ параллельна плоскости зеркала воды (т.е. $\beta_{pu} = 0$ и $\chi_{pu} = 0$); X_d, Y_d, Z_d – координаты d -го приемника в системе координат ППУ, вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned} X_d &= X_{pa} + V_d \cdot \cos(\omega - \alpha_{pu}) \cdot \cos\psi, \\ Y_d &= Y_{pa} + U_d \cdot \sin(\omega - \alpha_{pu}) \cdot \cos\xi, \\ Z_d &= Z_{pa} - V_d \cdot \sin\psi - U_d \cdot \sin\xi. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь X_{pa}, Y_{pa}, Z_{pa} – координаты условного центра АНПА в системе координат ППУ; $\Delta\tau_{b,c,d}$ – погрешность оценки задержки прихода сигнала b -го излучателя на c -й и d -й приемники, распределенная по нормальному закону с СКП, максимальное значение которого находится по формуле [15, 16]

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\Delta f}, \quad (8)$$

где Δf – ширина полосы высокочастотного сигнала.

Синтез алгоритма определения координат АНПА в системе координат ППУ осуществим по критерию максимального правдоподобия. Результатом синтеза, с учетом нормальных плотностей распределения погрешностей оценок $\hat{\tau}_{b,c,d}$ и равенства их дисперсий, является алгоритм определения координат АНПА методом наименьших квадратов. Он заключается в следующем. Функционал

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=2}^D \sum_{c=1}^d I_{b,c,d} \cdot (\hat{\tau}_{b,c,d} - \tau_{b,c,d})^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $I_{b,c,d}$ – индикатор получения оценки задержки $\hat{\tau}_{b,c,d}$ на текущем цикле измерения ($I_{b,c,d} = 1$ – задержка получена, $I_{b,c,d} = 0$ – задержка не получена), минимизируется относительно координат условного центра X_{pa}, Y_{pa}, Z_{pa} и разности курса АНПА и угла ориентации ППУ $\Delta\kappa = \omega - \alpha_{pu}$ (см. далее) при измеренных навигационной аппаратурой углах крена и дифферента АНПА, нулевых углах крена и дифферента ППУ.

Формула (9) предполагает, что задержки на выходе каждой пары приемников измеряются по сигналу одного (каждого) излучателя. Для повышения точности решения задачи количество слагаемых в (9) можно увеличить в B раз, если задержки измерять между сигналами разных излучателей. В этом случае формула (9) примет вид

$$\sum_{b=1}^B \sum_{e=1}^B \sum_{d=2}^D \sum_{c=1}^d I_{b,e,c,d} \cdot (\hat{\tau}_{b,e,c,d} - \tau_{b,e,c,d})^2 \rightarrow \min,$$

где $\tau_{b,e,c,d}, \hat{\tau}_{b,e,c,d}$ – истинное значение и оценка задержки прихода сигнала b -го излучателя на c -й приемник и e -го излучателя на d -й приемник; $I_{b,e,c,d}$ – индикатор получения оценки задержки $\hat{\tau}_{b,e,c,d}$ на текущем цикле измерения.

При этом истинное значение задержки $\tau_{b,e,c,d}$ вычисляется по формуле

$$\tau_{b,e,c,d} = \frac{|r_{b,c} - r_{e,d}|}{C_{zv}} + \Delta t_{b,e},$$

где $\Delta t_{b,e}$ – интервал времени между излучением сигналов b -м и e -м излучателями.

Если все сигналы всех излучателей имеют одинаковую структуру, измерение всех задержек $\hat{\tau}_{b,e,c,d}$ может выполняться корреляционным методом. В противном случае придется оценивать момент времени обнаружения каждого сигнала и вычислять их разность.

Решение будем искать циклически с периодом измерения всей совокупности задержек путем определения глобального минимума функционала (9) в окрестности начальных приближений искомых переменных. На первых циклах данного этапа начальные приближения определяются по данным, выработанным на предыдущем этапе причаливания с учетом экстраполяции на текущий момент времени:

$$\begin{aligned} X_{pa} &= -(R_{pu} - V_{pa} \cdot \Delta t) \cdot \sin(\omega - \alpha_{pu}), \\ Y_{pa} &= -(R_{pu} - V_{pa} \cdot \Delta t) \cdot \cos(\omega - \alpha_{pu}), \\ Z_{pa} &= H_{pu} - H_{pa}, \\ \omega &= P_{pu}, \end{aligned} \quad (10)$$

где R_{pu} – расстояние между ППУ и АНПА, измеряемое по данным режима опознавания;

P_{pu} – пеленг ППУ, измеряемый станцией ОГС;

V_{pa} – скорость ПА по данным лага;

Δt – интервал между текущим моментом времени и моментом времени измерения пеленга и дистанции;

H_{pa} – глубина погружения АНПА, определяемая датчиком глубины;

H_{pu} – глубина установки ППУ (либо глубина моря, измеренная при помощи эхолота и датчика глубины).

Так как угол ориентации ППУ априори неизвестен, то вместо определения курса АНПА при минимизации функционала (9) используется разность курса АНПА и угла ориентации ППУ $\Delta K = \omega - \alpha_{pu}$, которой в качестве начального приближения присваивается произвольное число в интервале $\pm 180^\circ$. На последующих циклах за начальные приближения координат АНПА и разности курса ΔK принимаются значения этих величин, найденные на предыдущем цикле.

По результатам определения величины ΔK , что при известном курсе АНПА эквивалентно определению угла ориентации ППУ, и разности глубин АНПА и ППУ на каждом цикле аппарат корректирует свой курс и глубину погружения таким образом, чтобы занять позицию над ППУ на расстоянии 5...10 м по вертикали от него, при которой условный центр АНПА оказался бы на оси Z системы координат ППУ. Затем, развернувшись вокруг оси Z , АНПА достигает совмещения своего курса с углом ориентации ППУ. В этом состоянии аппарат готов к причаливанию.

4. Алгоритм позиционирования АНПА на третьем этапе причаливания

На этом этапе АНПА вертикально погружается, чтобы занять заданную позицию на ППУ. Особенности процесса состоят в следующем:

- 1) учитывая, что АНПА необходимо причалить с погрешностью не более единиц сантиметров, следует определить углы крена и дифферента ППУ, которые на предыдущем этапе полагались нулевыми;
- 2) при сближении АНПА с ППУ по вертикали на дистанцию до единиц и долей метров часть излучателей затеняется корпусом аппарата. По той же причине при

излучении сигналов возникает реверберация, которая снижает точность измерения задержек между сигналами разных приемников. В этих обстоятельствах требуется применение специальных методов, обеспечивающих высокоточное позиционирование на предельно малых расстояниях между АНПА и ППУ.

Один из таких методов [17] состоит в переходе от измерения задержек к определению дальностей между излучателями и приемниками. Это достигается за счет синхронизации времени на АНПА и ППУ с последующим определением расстояния r_{bd} между b -м излучателем и d -м приемником путем умножения скорости звука на горизонте АНПА на разность времени приема и излучения сигнала.

В основе синхронизации времени на АНПА и ППУ лежат оценки дальностей между излучателями и приемниками, вычисленные методом короткой базы, а также тот факт, что разные излучатели посылают сигналы по жесткой программе с известными некротными интервалами. Из этих условий вытекает следующая стохастическая модель:

$$\hat{t}_{rec/b,d} = t_{iz/1} + \Delta t_b + \frac{\hat{d}_{b,d}}{C_{zv}}, \quad b=1, \dots, B; d=1, \dots, D, \quad (11)$$

где $\hat{t}_{rec/b,d}$ – оценка момента времени обнаружения сигнала b -го излучателя на выходе d -го приемника;

$t_{iz/1}$ – искомый момент времени излучения сигнала первым излучателем;

$\Delta t_{b,1}$ – известный интервал времени между излучением сигнала b -м и первым излучателями;

$\hat{d}_{b,d}$ – оценка расстояния между b -м излучателем и d -м приемником, полученная методом короткой базы.

Учитывая независимость погрешностей оценок $\hat{t}_{rec/b,d}$ и $\hat{d}_{b,d}$, искомый момент времени $t_{iz/1}$ может быть определен путем усреднения оценок по формуле

$$\tilde{t}_{iz/1} = \frac{1}{B \cdot D} \cdot \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D \left(\hat{t}_{rec/b,d} - \Delta t_b - \frac{\hat{d}_{b,d}}{C_{zv}} \right), \quad (12)$$

где $\tilde{t}_{iz/1}$ – усредненная оценка момента времени излучения сигнала первым излучателем.

СКП синхронизации $t_{iz/1} = 5$ мкс при полосе частот сигнала 20 кГц, отношении «сигнал–помеха» 20 дБ, СКП оценок расстояний 3 см, $B=3$ и $D=4$ [16].

Вычитая из каждого уравнения системы (11) одно из уравнений этой системы, например уравнение, соответствующее $b = 1$ и $d = 1$, получим:

$$\hat{t}_{rec/b,d} - \hat{t}_{rec/1,1} = \Delta t_b + \frac{\hat{d}_{b,d} - \hat{d}_{1,1}}{C_{zv}}, \quad b=2, \dots, B; d=2, \dots, D. \quad (13)$$

С использованием (13) путем усреднения оценок может быть уточнена скорость звука:

$$\tilde{C}_{zv} = \frac{1}{(B-1) \cdot (D-1)} \cdot \sum_{b=2}^B \sum_{d=2}^D \left(\frac{\hat{d}_{b,d} - \hat{d}_{1,1}}{\hat{t}_{rec/b,d} - \hat{t}_{rec/1,1} - \Delta t_b} \right), \quad (14)$$

где \tilde{C}_{zv} – усредненная оценка скорости звука.

С использованием оценок расстояний между излучателями и приемниками минимизация функционала (9) заменяется следующим образом:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D I_{b,d} \cdot \left[\tilde{C}_{zv} \cdot (\hat{t}_{rec/b,d} - \tilde{t}_{iz/1} - \Delta t_b) - d_{b,d} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $I_{b,d}$ – индикатор того, что расстояние между b -м излучателем и d -м приемником измерено на текущем цикле.

Алгоритм, реализующий метод короткой базы, изложен в работе [12] со следующими отличиями:

- на вход алгоритма поступают результаты измерения расстояний между всеми парами «излучатель–приемник», при этом происхождение результатов этих измерений и величин их погрешностей автором не объясняется;
- на каждом цикле работы алгоритма начальные приближения для итерационной процедуры по определению координат приемников в системе координат ППУ рассчитываются с использованием оценок расстояний между некоторыми базовыми парами «излучатель–приемник» на основе уравнений, не учитывающих стохастические свойства помех измерений;
- скорость звука предполагается известной с высокой степенью точности.

Рассмотрим второй метод, который обеспечивает высокоточное позиционирование на предельно малых расстояниях между АНПА и ППУ. Он основан на использовании имеющейся на АНПА видеокамеры с прожектором и объективом, направленным под углом вниз. На ППУ необходимо расположить несколько разнесенных в пространстве светоотражающих маркеров (рис. 2) [17–19].



Рис. 2. Примеры маркеров (белым цветом выделены светоотражающие участки, черным – светопоглощающие)

Световые маркеры выполняют роль искусственных реперных ориентиров, которые легко обнаруживаются системами компьютерного зрения и позволяют вычислить их точное трехмерное положение относительно камеры. Маркеры похожи на QR-коды в том смысле, что они представляют собой тип двумерного штрихкода, однако предназначены для кодирования гораздо меньшего количества полезных данных (от 4 до 12 бит), что обеспечивает их более надежное обнаружение и на больших расстояниях.

Для вычисления положения светоотражающего маркера используется метод AprilTags3D, который обеспечивает совместную обработку двух или более маркеров, расположенных в разных плоскостях под небольшим углом друг к другу [17–19]. Моделирование метода предполагается выполнить в последующих работах авторов.

В результате на данном этапе необходимо определить координаты условного центра АНПА X_{pa}, Y_{pa}, Z_{pa} , разность $\Delta K = \omega - \alpha_{pu}$, а также углы дифферента β и крена χ ППУ. Углы дифферента и крена АНПА с высокой точностью измеряет его навигационная

система. В качестве начальных приближений при поиске минимума функционала (15) используются результаты определения искомых параметров на предыдущем цикле.

5. Пример моделирования процессов приведения и причаливания АНПА к ППУ

Моделирование осуществлялось для следующих исходных данных.

1. ППУ установлено на дне на глубине 300 м под углами ориентации $\alpha_{pu} = 90^\circ$, дифферента $\beta = 1^\circ$, крена $\chi = 2^\circ$ (используются в дальнейшем лишь для оценки погрешности их выработки) и оборудовано:
 - станцией гидроакустической связи с ненаправленным приемопередателем, способной работать в режиме опознавания, которая обменивается с АНПА частотно модулированными сигналами с полосой 3 кГц на частоте 30 кГц при давлении излучаемого сигнала 170 дБ×м относительно 20 мкПа;
 - тремя ($B = 3$) высокочастотными ненаправленными излучателями с координатами X'_b, Y'_b, Z'_b (в метрах) в системе координат ППУ при условии его строго горизонтального положения (1.6, 3.0, 0.5), (-1.6, -3.0, 1.5), (-1.6, -2.0, 2.0); излучатели поочередно подают сигналы длительностью 1 мс, давлением 150 дБ×м относительно 20 мкПа на частоте 200 кГц, в полосе 20 кГц с интервалами 50, 70 и 130 мс.
2. АНПА оборудован:
 - станцией гидроакустической связи, работающей в режиме опознавания;
 - станцией ОГС с диапазоном частот, обеспечивающим пеленгование ответного сигнала опознавания;
 - четырьмя ($D = 4$) высокочастотными ненаправленными приемниками с координатами U_d, V_d, W_d (в метрах) в системе координат АНПА (1.0, 6.0, 0.0), (-1.0, 2.0, 0.0), (1.0, -2.0, 0.0), (-1.0, -6.0, 0.0).
3. АНПА посылает сигналы опознавания начиная с расчетной дистанции обнаружения сигнала запроса, составляющей 7 км.
4. Расчетная дистанция обнаружения сигналов высокочастотных излучателей составляет 40 м.
5. СКП измерения параметров составляют:
 - дистанции по сигналам опознавания – 2% от измеряемой дистанции;
 - пеленга по данным станции ОГС – 3°;
 - задержки приема сигнала высокочастотного излучателя двумя приемниками – 50 мкс.

Результаты моделирования приведены на рис. 3–6.

На рис. 3 и 4 показаны траектории движения АНПА во время приведения и причаливания к ППУ соответственно в горизонтальной и вертикальной проекциях. Это движение включает 3 этапа:

- на первом АНПА на скорости 1 м/с перемещается от точки, где был получен первый ответный сигнал опознавания, на расстояние 40 м, после чего начинает работать метод позиционирования с короткой базой;
- на втором АНПА на скорости 0,1 м/с движется от второй точки на рисунке до занятия позиции над ППУ;
- на третьем АНПА вертикально погружается до причаливания к ППУ.

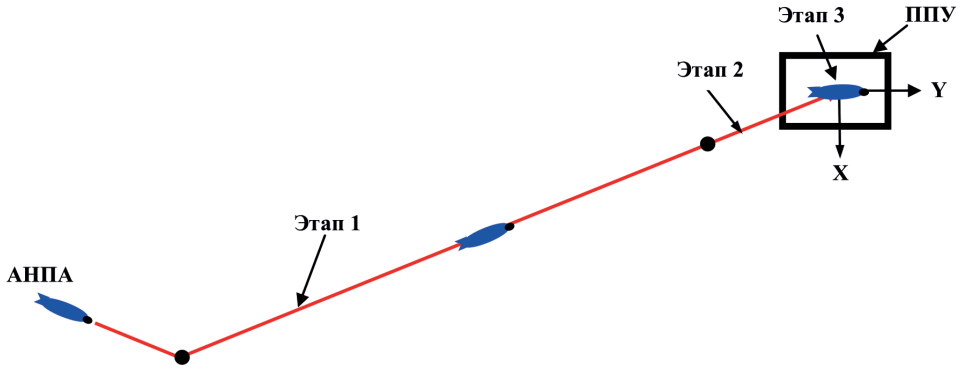


Рис. 3. Горизонтальная проекция траектории движения АНПА

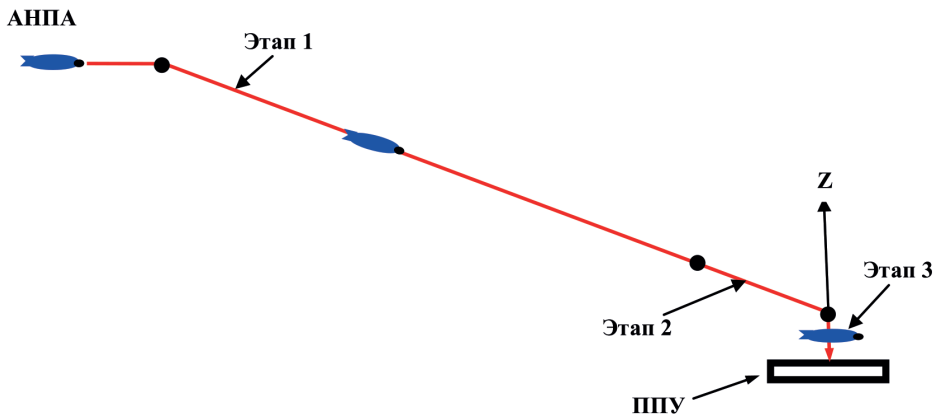


Рис. 4. Траектория движения АНПА в вертикальной плоскости

На рис. 5 и 6 показаны зависимости от времени погрешностей оценки координат условного центра и курса АНПА на последних трехстах метрах приведения и причаливания. На первом этапе оценка координат АНПА выполнялась с периодичностью 30 с, на последующих этапах – 1 с. Погрешности приведены с учетом сглаживания десяти последних оценок. Первый этап продолжается до 350-й секунды, второй – до 650-й, третий – до 820-й.

Из рис. 5 и 6 можно сделать следующие выводы:

- на первом этапе погрешности определения координат X и Y уменьшаются от сотен метров на дистанции 7 км до 2 м на расстоянии 40 м от ППУ. Погрешности оценки координаты Z и курса АНПА от дистанции не зависят и составляют единицы метров и единицы градусов соответственно;
- на втором этапе при позиционировании методом короткой базы погрешности оценки всех трех координат уменьшаются от 30 см в начале этапа до 2 см в конце. Погрешность курса – в пределах $0,2^\circ$;
- на третьем этапе при позиционировании методом короткой базы погрешности оценки всех параметров сначала соответствуют погрешностям, полученным в конце второго этапа, а затем начинают возрастать, что подтверждает сделан-

ный выше вывод о необходимости специальных мер по повышению точности позиционирования АНПА на сверхмалых расстояниях. На рис. 7 приведены зависимости от времени погрешностей оценки координат условного центра АНПА на третьем этапе причаливания, выполненные с помощью метода измерения расстояний между высокочастотными источниками и приемниками путем минимизации функционала (15). Из рисунка следует, что погрешности оценки всех координат не превышают 5 см.

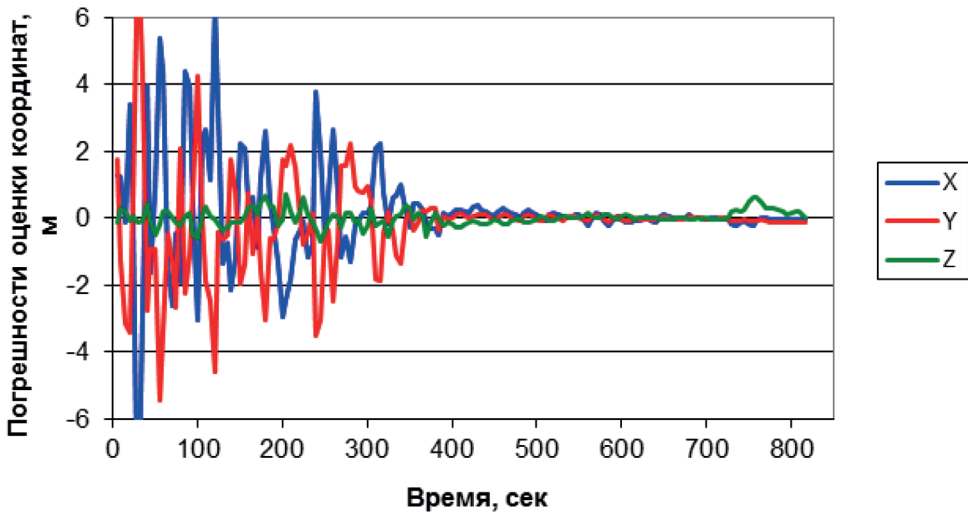


Рис. 5. Зависимость от времени погрешностей оценки координат условного центра АНПА

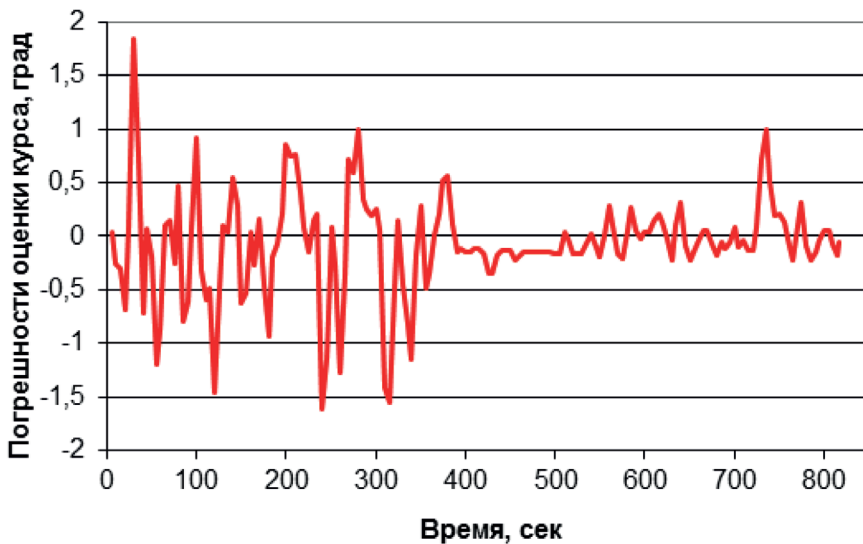


Рис. 6. Зависимость от времени погрешности оценки курса АНПА

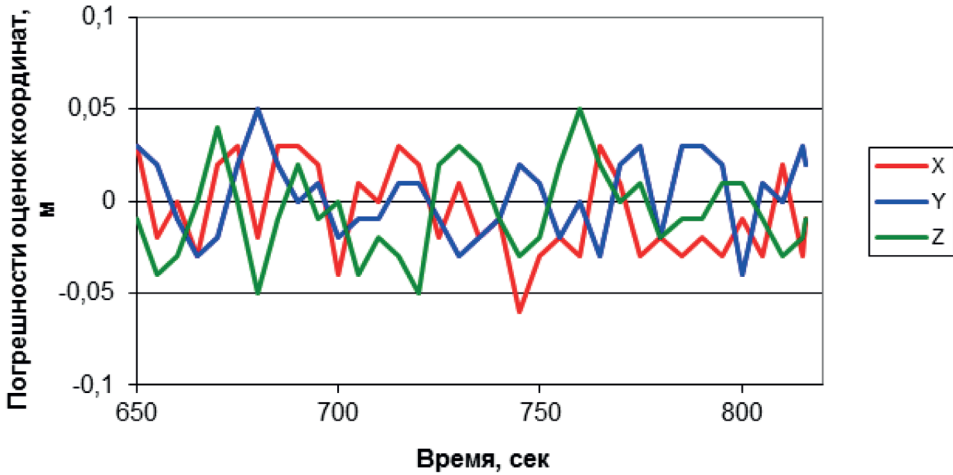


Рис. 7. Зависимость от времени погрешностей оценки координат условного центра АНПА на третьем этапе причаливания, выполненной методом измерения расстояний между высокочастотными источниками и приемниками

6. Оценка времени позиционирования АНПА в процессе причаливания к ППУ

В разделе оценивается время, дополнительно затрачиваемое на реализацию собственно алгоритмов причаливания, используемых помимо штатных, которые предназначены для решения других задач. Это необходимо, чтобы понять, применимы ли алгоритмы причаливания на штатном процессоре АНПА.

Наиболее высокие требования к производительности вычислителя предъявляют второй и третий этапы причаливания.

Время вычисления координат АНПА методом короткой базы на втором этапе складывается из времени:

- вычисления задержек между сигналами высокочастотных излучателей, принимаемых парами высокочастотных приемников;
- поиска координат АНПА, соответствующих минимуму функционала (9).

Время вычисления координат АНПА в процессе приведения к ППУ оценивалось путем определения, какова длительность реализации на используемом компьютере одного цикла позиционирования в процессе моделирования второго этапа приведения, и последующего пересчета полученного результата на предполагаемый бортовой вычислитель АНПА.

Для моделирования использовался персональный компьютер IntelCorei7-4770К с тактовой частотой 3,5 ГГц и объемом оперативной памяти 8 Гбайт.

Задержки сигналов измерялись путем вычисления во временной области взаимно корреляционной функции сигналов, принятых каждой парой приемников, с последующим поиском максимума этой функции и определения ее абсциссы [15, 16].

При длительности высокочастотного сигнала 1 мс и частоте его дискретизации 512 кГц цифровой сигнал укладывается в 512 отсчетов. Время вычисления задержки между такой парой сигналов и определения абсциссы максимума составило 5,6 мс.

Следовательно, на вычисление задержек всех $B = 3$ сигналов между всеми $(D^2 - D)/2 = 6$ -ю парами приемников требуется $5,6 \times 3 \times 6 = 100,8$ мс.

Координаты минимума функционала (9) определялись прямым перебором 14641-й точки в пространстве 4-х координат АНПА (по 11 точек на каждую координату). Время счета составило 62 мс.

Таким образом, общее время определения координат АНПА на одном цикле вычислений составило $100,8 + 62 = 162,8$ мс. Заметим, что измерение задержек имеет большую продолжительность, чем работа алгоритма позиционирования.

В АНПА широко применяется энергоэффективный процессор Intel Celeron N2820 с тактовой частотой 2,4 ГГц.

В процессе приведения и причаливания другие ресурсоемкие задачи, как правило, не решаются, поэтому нет необходимости в обмене большими объемами данных, которые нагружают оперативную память. Следовательно, предполагая, что процесс однопотоковый, можем вычислить соотношение производительности систем Q , построенных на упомянутых выше процессорах, руководствуясь, например, результатами теста Cinebench 11.5 64-bit single-core [21], в соответствии с которым $Q = 4,5$. Иначе говоря, в нашем случае время определения координат АНПА на одном цикле вычислений в бортовом вычислителе АНПА составит $162,8 \times 4,5 = 732,6$ мс.

Таким образом, производительность бортового вычислителя позволяет осуществлять позиционирование АНПА на 2-м этапе причаливания с частотой 1 Гц.

На третьем этапе причаливания требования к производительности вычислителя меньше, чем на 2-м, поскольку на каждом цикле позиционирования:

- 1) вместо 18 задержек корреляционным методом измеряются 12 моментов обнаружения сигналов трех излучателей на выходе четырех приемников. В результате время измерения составляет $5,6 \times 12 = 67,2$ мс;
- 2) несмотря на то что вместо четырех параметров на третьем этапе путем минимизации функционала (15) определяются 6 параметров, время счета не увеличивается, поскольку суммируются 12 слагаемых вместо 18 и поиск минимума ввиду высокой точности начального приближения осуществляется по 5 точкам каждой координаты вместо 11.

Заключение

В статье приведены алгоритмы позиционирования АНПА относительно ППУ на разных этапах его приведения и причаливания. В качестве ППУ используется установленная на дне площадка, к которой АНПА должен причаливать путем вертикального погружения на ровном киле в строго определенной ориентации по курсу.

Показано, что:

- на расстояниях до ППУ от единиц километров до десятков метров позиционирование целесообразно осуществлять на основе определения дистанции и пеленга ППУ по ответному сигналу опознавания;
- на расстояниях от десятков метров до занятия позиции над ППУ следует воспользоваться методом короткой базы по сигналам высокочастотных излучателей, расположенных на ППУ, и приемников, установленных на АНПА;
- при непосредственном причаливании к ППУ метод короткой базы следует дополнить методами, которые обеспечивают позиционирование на предельно ма-

лых расстояниях между АНПА и ППУ, в частности рассмотренным методом измерения расстояния между излучателями и приемниками, основанным на синхронизации времени на АНПА и ППУ, а также упомянутым методом, использующим специальные оптические маркеры.

Моделирование решения рассматриваемой задачи показало, что погрешности позиционирования АНПА описанными методами составляют:

- на первом этапе погрешности определения координат X и Y уменьшаются от сотен метров на дистанции 7 км до 2 м на дистанции 40 м от ППУ. Погрешности координаты Z и курса АНПА не зависят от дистанции и составляют единицы метров и единицы градусов соответственно;
- на втором этапе погрешности оценки всех трех координат уменьшаются от 30 см в начале до 2 см в конце. Погрешность курса не превышает $0,2^\circ$;
- на третьем этапе погрешности всех параметров такие же, как и в конце предыдущего этапа.

Моделирование позволило оценить, сколько времени займет решение задачи позиционирования на персональном компьютере, а сколько – в бортовом вычислителе АНПА. Показано, что на одном цикле позиционирования время решения задачи в широко применяемом бортовом вычислителе составит не более 1 с.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.** Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
2. **Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашнин А.Г.** Донные причальные устройства для автономных обитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. 2011. №1 (54). С. 13–21.
3. **Патент РФ № 2767384** с приоритетом от 15.09.21. Мобильная распределенная система подводного наблюдения. Авторы: Грязин Д.Г., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Опубл. 17.03.22, бюлл. № 8.
4. **Moline, M.A., Schofield, O.,** Remote real-time video-enabled docking for underwater autonomous platforms, *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2009, vol. 26, pp. 2665–2672.
5. **Feezor, M.D., Sorrell, F.Y., Blankinship, P.R., Bellingham, J.G.,** Autonomous Underwater Vehicle Homing/Docking via Electromagnetic Guidance, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2001, vol. 26, no. 4, pp. 515–521.
6. **Inzartsev, A.V., Matvienko, Yu.V., Pavin, A.M., Vaulin, Yu.V., Scherbatyuk, A.Ph.,** Investigation of Autonomous Docking System Elements for Long Term AUV, *Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference*, 2005, Washington, USA.
7. **Sotiropoulos, P., Tosi, N., Andritsos, F., Geffard, F.,** Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: the DIFIS Deployment Case, *OceanEng.*, 2012, no. 46(7), pp. 33–45.
8. **Song, S., Hu, C., Li, B., Li, X., Meng, M.Q.-H.,** An Electromagnetic Localization and Orientation Method Based on Rotating Magnetic Dipole, *IEEE Transactions on Magnetism*, 2013, no 3.
9. **Li, D.J., Chen, Y.H., Shi, J.G., Yang, C.J.,** Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network, *Ocean Engineering*, 2015, no. 109, pp.127–134.
10. **Колесников М.П., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В., Шелест П.С.** Метод позиционирования АНПА в процессе приведения к причальному устройству // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 2. С. 38–48.
11. **Кебкал К.Г., Машошин А.И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных обитаемых подводных аппаратов // Гирроскопия и навигация. 2016. Т. 24. №3 (94). С. 115–130.
12. **Кошаев Д.А.** Относительное позиционирование и определение ориентации автономного обитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гирроскопия и навигация. 2022. Т. 30. №4 (119). С. 122–141.

13. Грузликов А.М. Навигация АНПА в ближнем поле в интересах решения задачи приведения к причальному устройству // Труды XXIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2022. С.
14. Машошин А.И., Пашкевич И.В. Применение подводных пассивных ориентиров для навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирокоспия и навигация. 2020. Т. 28. №3 (110). С. 95–108.
15. Kozick, R.J., Sadler, B.M., Communication channel estimation and waveform design: time delay estimation on parallel, flat fading channel, US Army research laboratory, 2010, 42 p.
16. Weiss, A., Weinstein, E., Fundamental Limitations in Passive Time-Delay Estimation. Part II: Wide-band Systems, *IEEE Trans. on Acoust., Speech, and Sig. Proc.*, Oct. 1984, 32 (5), 1064–1078.
17. Пашкевич И.В., Мартынова Л.А. Метод уменьшения погрешности определения местоположения АНПА при посадке на подводное причальное устройство // Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». 2023 (в печати).
18. Mateos, L.A., AprilTags3D: Dynamic fiducial markers for robots pose estimation in highly reflective environments and indirect communication in swarm robotics, *arXiv: 2001.08622v1 [cs.RO]*, 2020.
19. Mateos, L.A., Robotics boats latching: AprilTags3D, 2019, <http://www.pardiclerobots.com/luisimateos/latching/index.html>.
20. Mateos, L.A., Wang, W., Gheneti, B., Duarte, F., Ratti, C., Rus, D., Autonomous latching system for robotic boats, *Int. Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 7933–799939.
21. www.technical.city/ru/cpu.
22. Матвиевко Ю.В. Гидроакустический комплекс навигации подводного робота. Дис. ... докт. техн. наук. Владивосток, 2004. 271 с.

Mashoshin, A.I. and Pashkevich, I.V. (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia)
AUV Positioning Algorithms Used in Its Homing and Docking to Underwater Docking Station, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 1 (120), pp. 103–119.

Abstract. AUV positioning algorithms used in its homing and docking to underwater docking station are described. The homing and docking trajectory consists of several steps, where different positioning methods are applied using the standard equipment onboard modern heavy-class AUVs. Positioning errors at each step are estimated. The duration of positioning by the AUV onboard computer is assessed.

Key words: autonomous underwater vehicle, underwater docking station, positioning algorithms.

Материал поступил 23.01.2023