

УДК 626;
DOI 10.17285/0869-7035.0058

В. С. БЫКОВА, А. И. МАШОШИН, И. В. ПАШКЕВИЧ

АЛГОРИТМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Приведено описание двух алгоритмов обеспечения безопасности плавания автономных необитаемых подводных аппаратов: алгоритма расхождения с точечными препятствиями, к которым относятся все движущиеся подводные и надводные объекты, а также донные объекты ограниченных габаритов, и алгоритма обхода протяженных препятствий, в частности подводных возвышенностей, неровностей нижней кромки льда, мусорных островов. Алгоритмы разработаны для системы управления тяжелым автономным необитаемым подводным аппаратом.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, подводное препятствие, алгоритм обхода неподвижного подводного препятствия.

Введение

Одной из задач, решаемых системой управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА), является обеспечение безопасности его плавания, под которой понимается исключение столкновений с неподвижными и подвижными подводными и надводными препятствиями [1]. Этому вопросу посвящено значительное число отечественных и зарубежных публикаций [1–17].

К подвижным препятствиям, которые могут встретиться в любом районе Мирового океана, относятся подводные лодки, АНПА, надводные корабли и суда, а также крупные морские млекопитающие.

В качестве неподвижных препятствий могут выступать [2–4]:

- при плавании АНПА вдоль береговой черты – берег;
- при плавании в непосредственной близости от дна – неровности морского дна и затонувшие корабли;
- при плавании подо льдом – неровности нижней кромки льда;
- при плавании в высоких широтах – айсберги;
- при плавании в океанах – мусорные острова;
- при всплытии АНПА на поверхность – надводные корабли и суда, лежащие в дрейфе.

Быкова Валентина Сергеевна. Инженер-программист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

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

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

Обеспечение безопасности плавания АНПА достигается путем комплексного решения следующих задач:

- выбора наиболее безопасного маршрута АНПА для достижения целевой точки, что подразумевает прокладку маршрута вне районов интенсивного судоходства и рыболовства, добычи полезных ископаемых на морском шельфе, ледохода, мусорных островов [2–4];
- выбора глубины АНПА, минимизирующей вероятность столкновения с препятствием;
- своевременного обнаружения препятствия [1, 6, 7];
- рационального маневрирования АНПА для обхода неподвижного препятствия [1, 7–12].

Как показал анализ публикаций, данная задача рассматривается применительно к легким АНПА, оснащенным высокочастотными впередсмотрящими гидролокаторами с узкими секторами обзора и с дальностью обнаружения препятствий не более 100 м. Наличие гидролокаторов указанного типа предполагает обход неподвижного препятствия путем огибания на небольшом расстоянии каждой неровности препятствия. В связи с этим основной проблемой, решаемой системой управления, является выбор скорости АНПА, при которой радиус его циркуляции позволит безопасно совершить маневр огибания очередной неровности препятствия. Ввиду этого время обхода неподвижного препятствия и, соответственно, энергетические затраты на эту операцию велики.

В последние годы начали пользоваться спросом так называемые тяжелые АНПА, габариты которых позволяют оборудовать их более эффективными техническими средствами, в частности мощной энергетической системой, развитыми средствами навигации и освещения подводной обстановки [18, 19], что дает возможность решать поставленные задачи на большом расстоянии от базы. Поскольку гидролокаторы тяжелых АНПА характеризуются широким сектором обзора и большой дальностью обнаружения препятствий, то стратегия обеспечения безопасности аппаратов заключается в заблаговременном обнаружении препятствия и безопасном его обходе (расхождении с ним) за минимальное время.

В настоящей работе излагаются разработанные авторами два алгоритма обеспечения безопасности плавания для системы управления тяжелым АНПА.

В ходе их разработки оказалось, что встречаемые в море препятствия удобнее делить не на подвижные и неподвижные, а на точечные (сосредоточенные) и протяженные. Под точечными будем понимать препятствия, максимальный горизонтальный радиус которых не превышает нескольких сотен метров. В этот класс препятствий попадают все движущиеся морские объекты, буровые вышки и другие гидротехнические сооружения, а также донные объекты ограниченных габаритов, например затонувшие корабли. На дальности более 1 км эхосигналы от точечных объектов наблюдаются в одном пространственном канале (соответствующем одной характеристике направленности приемной антенны) приемного тракта, что позволяет отличать их от протяженных неподвижных препятствий, перечисленных выше.

Описание алгоритма расхождения с точечным препятствием

Алгоритм расхождения с точечным препятствием должен удовлетворять критерию безопасности маневра расхождения. Это означает, что наименьшее расстояние

между АНПА и точечным препятствием (подвижным либо неподвижным) в процессе расхождения должно превышать минимально допустимое как по дистанции, так и по глубине.

В процессе движения по маршруту гидролокатор АНПА периодически сканирует пространство во всем секторе обзора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При обнаружении отражающего объекта в первую очередь определяются его пространственная протяженность и подвижность. Как было отмечено выше, объект считается точечным, если эхосигнал от него присутствует только в одном пространственном канале наблюдения, в противном случае объект считается протяженным. Подвижность объекта определяется путем измерения его скорости по динамике изменения пеленга и доплеровскому смещению частоты эхосигнала.

Если объект оказался точечным, управление передается алгоритму расхождения с точечным препятствием, описание которого приводится ниже (см. блок-схему на рис. 1).

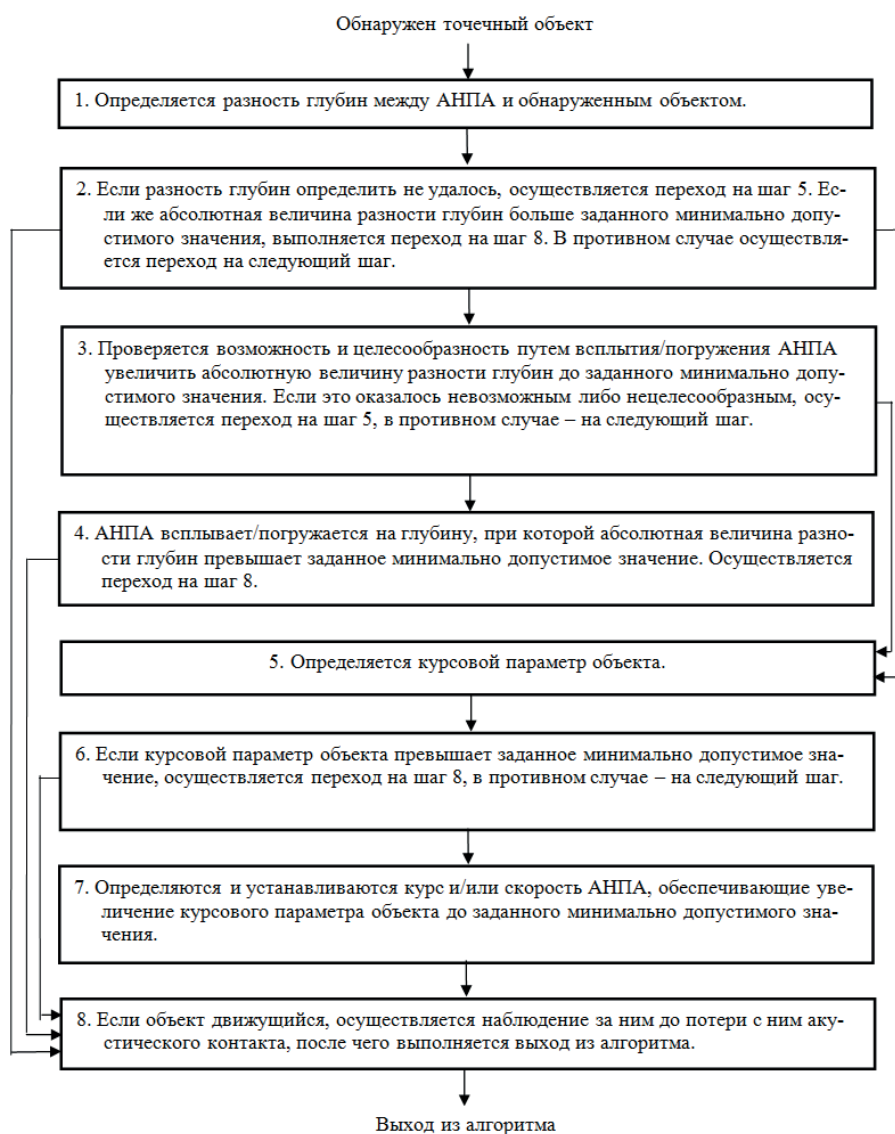


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расхождения АНПА с точечным препятствием

1. Определяется разность глубин ΔH между АНПА и обнаруженным объектом. На дистанциях до 1,5 км это можно сделать путем решения простой геометрической задачи (рис. 2):

$$\Delta H = R_1 \cdot \sin(|\varphi_1| - k \cdot \sigma_\varphi), \quad (1)$$

где R_1 – наклонная дистанция до объекта в момент его обнаружения;

φ_1 – угол в вертикальной плоскости, на котором обнаружен эхосигнал от объекта (отсчитывается от плоскости горизонта: вверх – с плюсом, вниз – с минусом);

σ_φ – среднеквадратическая погрешность (СКП) определения угла φ_1 ;

k – коэффициент, зависящий от заданной доверительной вероятности ($k = 2 \dots 3$).

Заметим, что учет СКП определения угла φ_1 в формуле (1) обусловлен низкой точностью измерения вертикального угла прихода эхосигнала в гидролокаторах АНПА вследствие ограниченной высоты приемной антенны.

На дистанциях более 1,5 км разность глубин должна рассчитываться с учетом рефракции акустических лучей с использованием специальной лучевой программы расчета акустического поля, которая реализует описанный в [20] алгоритм. При этом надо иметь в виду, что в ряде гидроакустических условий эхосигналы от объектов, находящихся на разных глубинах, приходят на вход приемной антенны в одном и том же достаточно узком секторе вертикальных углов, что делает определение разности глубин с использованием формулы (1) невозможным.

Задача упрощается, если обнаруженный объект классифицирован как надводный корабль. Тогда разность глубин ΔH равна глубине погружения АНПА.

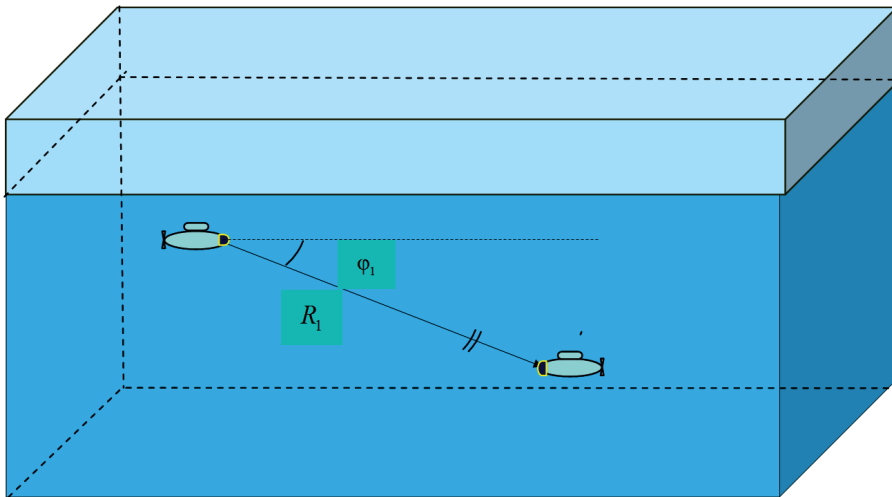


Рис. 2. Пример обнаружения подвижного точечного препятствия

2. Если разность глубин определить не удалось, осуществляется переход на шаг 5. Если же абсолютная величина разности глубин ΔH больше заданного минимально допустимого значения ΔH_{min} , выполняется переход на шаг 8. В противном случае осуществляется переход на следующий шаг.

3. Путем всплытия либо погружения АНПА проверяется возможность и целесообразность увеличения абсолютной величины разности глубин до заданного ми-

нимально допустимого значения ΔH_{min} . Если это оказалось невозможным (например, вследствие небольшой глубины моря) либо нецелесообразным (например, ввиду большого расхода электроэнергии на изменение глубины), осуществляется переход на шаг 5, в противном случае – на следующий шаг.

4. АНПА всплывает либо погружается на глубину, при которой абсолютная величина разности глубин превышает заданное минимально допустимое значение ΔH_{min} . Осуществляется переход на шаг 8.

5. По данным гидролокатора определяется расстояние, на котором произойдет расхождение с обнаруженным объектом, называемое курсовым параметром d [21]. Курсовой параметр вычисляется по формуле [22] (рис. 3)

$$d = R_1 \cdot \sin(Q_p), \tag{2}$$

где Q_p – относительный курсовой угол объекта, вычисляемый по формуле

$$Q_p = \arcsin \frac{R_2 \cdot \sin(\Pi_2 - \Pi_1)}{V_p \cdot \Delta t}, \tag{3}$$

V_p – относительная скорость объекта, вычисляемая по формуле

$$V_p = \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\Pi_2 - \Pi_1)}}{\Delta t}, \tag{4}$$

R_2 – дистанция до объекта, измеренная через интервал времени Δt с момента его обнаружения;

Π_1, Π_2 – пеленги объекта, измеренные в момент его обнаружения и через интервал времени Δt соответственно.

Заметим, что, строго говоря, в формулах (2)–(4) должны использоваться не наклонные дистанции R_1 и R_2 , а их проекции на горизонтальную плоскость. Тем не менее в силу малости углов φ_1 и φ_2 разности между наклонными дистанциями и их проекциями будут невелики, и ими можно пренебречь.

6. Если вычисленное значение d превышает заданную минимально допустимую дистанцию безопасного расхождения d_{min} , АНПА продолжает движение с прежними параметрами. Осуществляется переход на шаг 8. В противном случае – на следующий шаг.

7. Если значение курсового параметра d оказалось меньше минимально допустимой величины d_{min} , система управления АНПА определяет, как нужно изменить курс и/или скорость АНПА, чтобы курсовой параметр превысил минимально допустимое значение. Для этого сначала рассчитываются параметры движения объекта [22]:

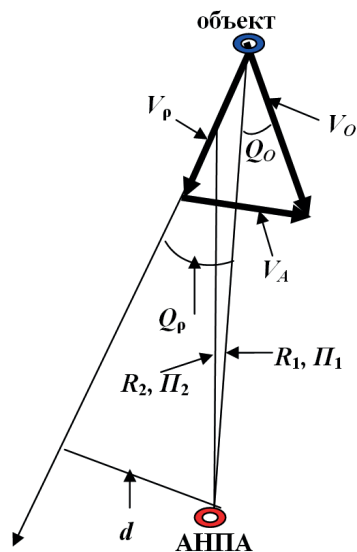


Рис. 3. Графическое изображение относительного движения АНПА и обнаруженного объекта в проекции на горизонтальную плоскость (V_o – скорость объекта, V_A – скорость АНПА, V_p – относительная скорость объекта)

- относительный курс объекта

$$K_p = \Pi_1 + \arcsin \frac{R_2 \cdot \sin(\Pi_2 - \Pi_1)}{V_p \cdot \Delta t} \pm 180; \quad (5)$$

- скорость объекта

$$V_o = \sqrt{V_A^2 + V_p^2 - 2 \cdot V_A \cdot V_p \cdot \cos(K_p - K_A)}; \quad (6)$$

- курс объекта

$$K_o = K_p + \arcsin \left[\frac{V_A}{V_o} \cdot \sin(K_p - K_A) \right]; \quad (7)$$

- курсовой угол объекта

$$Q_o = \Pi_1 - K_o \pm 180, \quad (8)$$

где K_A и V_A – соответственно курс и скорость АНПА.

Если выполняется условие [22]

$$\left| V_o \cdot \sin \left(Q_o - \arctg \frac{d_{min}}{R_1} \right) \right| < V_A, \quad (9)$$

то маневр расхождения можно осуществить путем изменения либо курса, либо скорости, либо того и другого одновременно.

Если маневр осуществляется посредством изменения только курса, то его новое значение (при условии минимального изменения) определяется по формуле [22]

$$K_{A/new} = K_A + \arctg \frac{d_{min}}{R_1} - \arcsin \left[\frac{V_o}{V_A} \cdot \sin \left(Q_o - \arctg \frac{d_{min}}{R_1} \right) \right]. \quad (10)$$

Если условие (9) не выполняется, маневр расхождения должен выполняться за счет изменения скорости либо скорости и курса одновременно. При этом минимальное значение новой скорости имеет место при новом курсе [22]

$$K_{A/new} = K_A + \arctg \frac{d_{min}}{R_1} \pm 90 \quad (11)$$

и составляет [22]

$$V_{A/new} = V_o \cdot \sin \left(Q_o - \arctg \frac{d_{min}}{R_1} \right). \quad (12)$$

Рассчитав новые параметры движения, система управления выдает соответствующие команды движительно-рулевому комплексу.

Если подвижный объект обнаружен на небольшой дистанции и времени для определения его курса и скорости недостаточно, в качестве критерия его опасности вместо курсового параметра можно использовать скорость изменения пеленга объекта $\dot{\Pi}$. Если абсолютная величина $\dot{\Pi}$ близка к нулю, что свидетельствует о возможном столкновении, АНПА необходимо повернуть в сторону, противоположную стороне изменения пеленга, и лечь на курс, перпендикулярный линии пеленга.

8. Если обнаруженный точечный объект является движущимся объектом, необходимо иметь в виду, что он может изменить направление и скорость своего движе-

ния. По этой причине он должен отслеживаться гидролокатором до момента потери контакта с ним. Если объект маневрирует, описанные процедуры необходимо повторить с первого шага. При потере акустического контакта с объектом осуществляется выход из алгоритма.

Описание алгоритма обхода протяженного препятствия

Алгоритм обхода протяженного препятствия (ПП) должен удовлетворять критерию минимального времени обхода. Это означает, что обход следует выполнять по траектории, наиболее близкой к прямой линии.

Алгоритм обхода протяженного препятствия приводится ниже (блок-схему алгоритма см. на рис. 4).

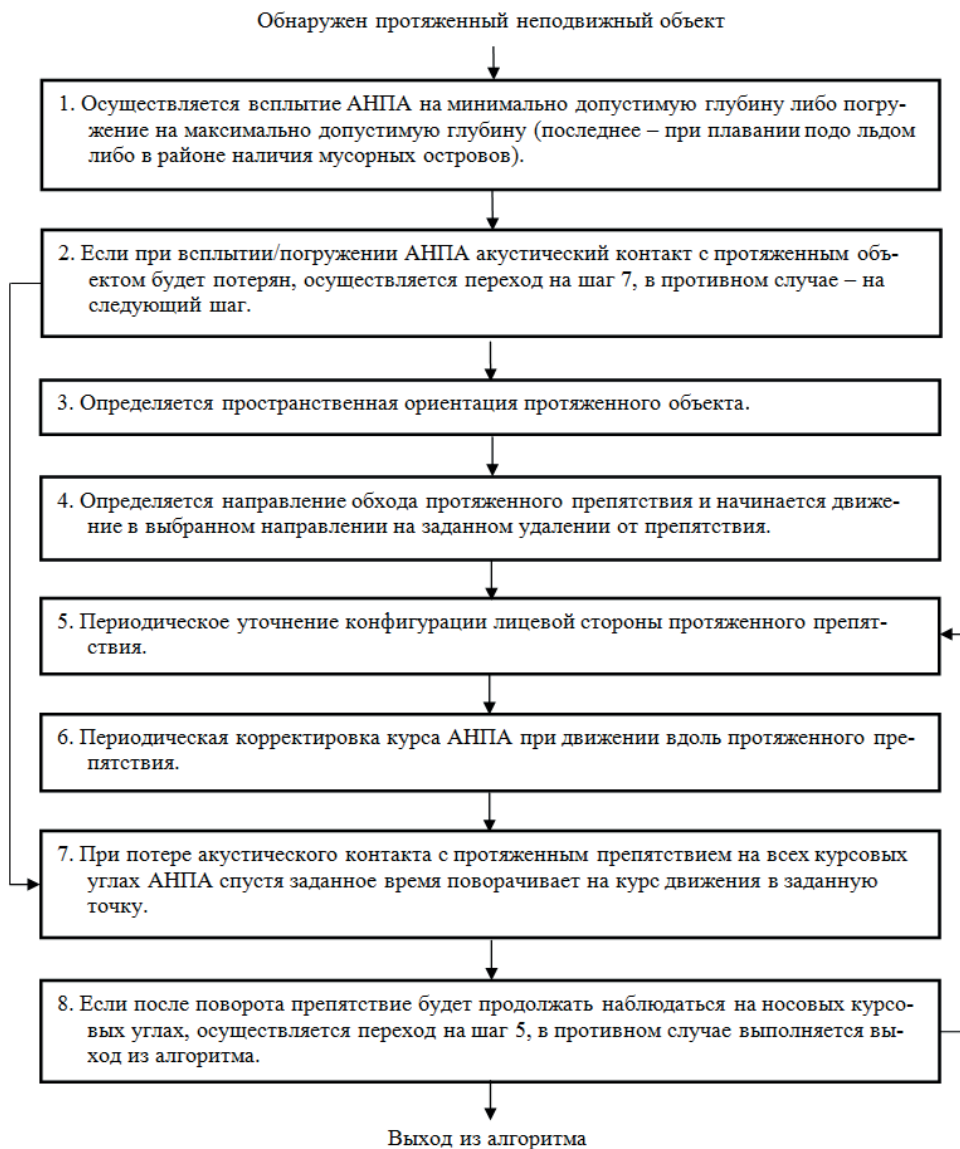


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расхождения АНПА с протяженным препятствием

1. Если обнаруженный объект оказался протяженным, занимающим большой сектор курсовых углов, и разойтись с ним без изменения курса АНПА не представляется возможным, прежде всего делается попытка обогнуть его путем изменения глубины погружения АНПА [7]. Для этого при плавании в районе, свободном ото льда и мусорных островов, АНПА должен подвсплыть на минимально допустимую глубину, а при плавании подо льдом либо в районах возможного нахождения мусорных островов – погрузиться на максимально допустимую глубину. Учитывая, что всплытие/погружение АНПА происходит с одновременным горизонтальным движением вперед со скоростью V_{gor} , всплытие/погружение нужно начинать с дистанции R_{beg} , обеспечивающей в момент завершения маневра приближение к препятствию на расстояние, которое превышает минимально допустимое R_{min} . Если предположить, что препятствие является вертикальной стеной, перпендикулярной зеркалу воды, минимальное расстояние до него, с которого нужно начать маневр всплытия/погружения, рассчитывается по формуле

$$R_{beg} = R_{min} + V_{gor} \cdot \frac{|H_{beg} - H_{end}|}{\dot{H}}, \quad (13)$$

где H_{beg} , H_{end} – глубины АНПА в начале и в конце маневра;
 \dot{H} – скорость всплытия/погружения АНПА.

2. Если при всплытии/погружении гидроакустический контакт с протяженным объектом будет потерян, АНПА начинает движение с минимальной скоростью, не меняя курса. Если в течение рекомендованного времени протяженное препятствие не будет обнаружено, АНПА занимает прежнюю глубину. При этом, если при всплытии/погружении для занятия прежней глубины протяженный объект будет вновь обнаружен, АНПА должен вернуться на глубину, на которой протяженный объект не наблюдается.

3. Если маневрирование по глубине не привело к желаемому результату (например, в том случае, когда препятствие оказалось береговой чертой), то, находясь на минимальной (в случае обхода неровностей дна) или максимальной глубине (в случае преодоления неровностей нижней кромки льда либо мусорных островов), АНПА должен приступить к обходу препятствия по горизонтали. Для этого в первую очередь нужно определить пространственную ориентацию лицевой части препятствия. Учитывая возможности гидролокаторов, устанавливаемых на тяжелые АНПА, это можно сделать следующим образом. Гидролокатор измеряет дистанции до протяженного объекта на нескольких курсовых углах, например 0° , $\pm\varphi^\circ$ ($\varphi \approx 30^\circ$) и $\pm 90^\circ$ (рис. 5 и 6). Далее, если предположить, что лицевая часть препятствия представляет собой вертикально стоящую плоскость, рассчитывается пеленг линии пересечения этой плоскости с ровным дном:

$$Pel_{III} = Pel_{left} - \arcsin \frac{R_{right} \cdot \sin [2 \cdot (Pel_{right} - Pel_{left})]}{\sqrt{R_{left}^2 + R_{right}^2 - 2 \cdot R_{left} \cdot R_{right} \cdot \cos [2 \cdot (Pel_{right} - Pel_{left})]}}, \quad (14)$$

где Pel_{left} , Pel_{right} – пеленги, соответствующие крайнему левому и крайнему правому из пяти курсовых углов, на которых получен эхосигнал от препятствия и измерена дистанция до него (на рис. 5 $Pel_{left} = Pel_{-\varphi}$, $Pel_{right} = Pel_{+\varphi}$; на рис. 6 $Pel_{left} = Pel_0$, $Pel_{right} = Pel_{+90}$);
 R_{left} , R_{right} – дистанции, соответствующие пеленгам Pel_{left} , Pel_{right} .

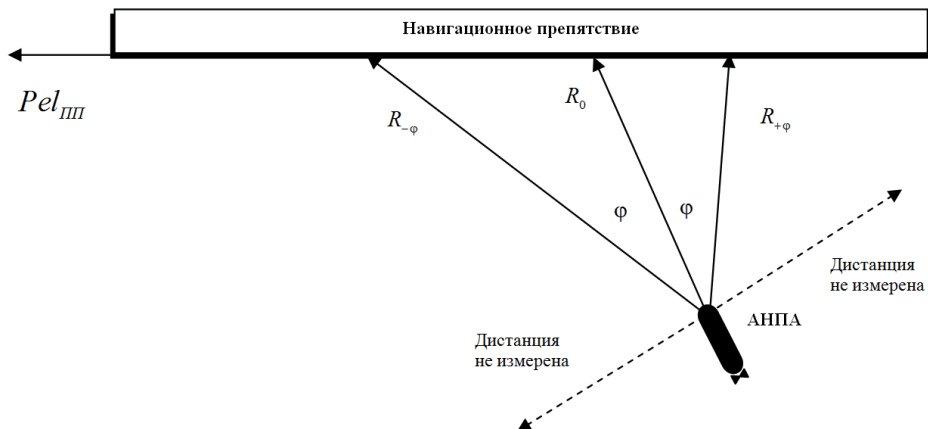


Рис. 5. Вариант взаимного расположения АНПА и протяженного препятствия в момент обнаружения последнего на трех носовых курсовых углах

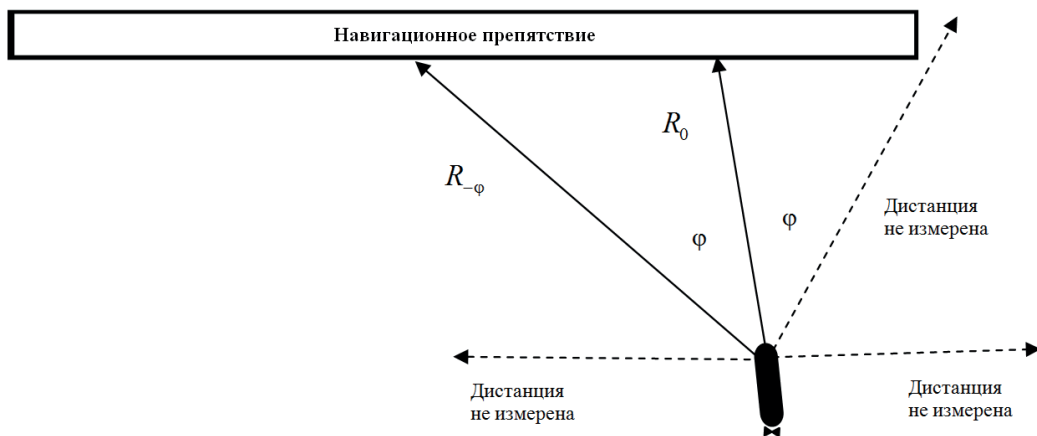


Рис. 6. Вариант взаимного расположения АНПА и протяженного препятствия в момент обнаружения последнего на двух носовых курсовых углах

4. Определив пространственную ориентацию препятствия, система управления АНПА выбирает направление движения вдоль линии Pel_{III} . Когда нет данных, чтобы судить о размере препятствия, целесообразно выбрать то направление, которое ближе к генеральному курсу АНПА. В соответствии с этой логикой в условиях, отображенных на рис. 5, АНПА целесообразно двигаться в левом направлении. Если же можно предположить, что контакт с препятствием на некотором курсовом угле отсутствует из-за его близкой границы, АНПА нужно повернуть в сторону этой границы. Согласно этому предположению, в условиях, отображенных на рис. 6, АНПА следует двигаться в правом направлении. Выбрав направление движения и рекомендованное расстояние до препятствия, система управления в нужный момент дает команду движительно-рулевому комплексу лечь на курс Pel_{III} либо обратный ему (рис. 7).

5. Учитывая, что на практике лицевая сторона препятствия не является плоскостью, система управления во время движения вдоль препятствия должна по данным

гидролокатора периодически уточнять ориентацию препятствия. Достигается это путем вычисления по формуле (14) последовательности значений $PeI_{III}^{(i)}$ и сглаживания их α -фильтром:

$$P\tilde{e}I_{III}^{(i)} = (1 - \alpha) \cdot P\tilde{e}I_{III}^{(i-1)} + \alpha \cdot PeI_{III}^{(i)}, \quad (15)$$

где $P\tilde{e}I_{III}^{(i)}$ – сглаженное значение ориентации препятствия, соответствующее i -му моменту времени;

α – коэффициент сглаживания. В зависимости от периодичности измерения $PeI_{III}^{(i)}$ $\alpha = 0,3 \dots 0,7$.

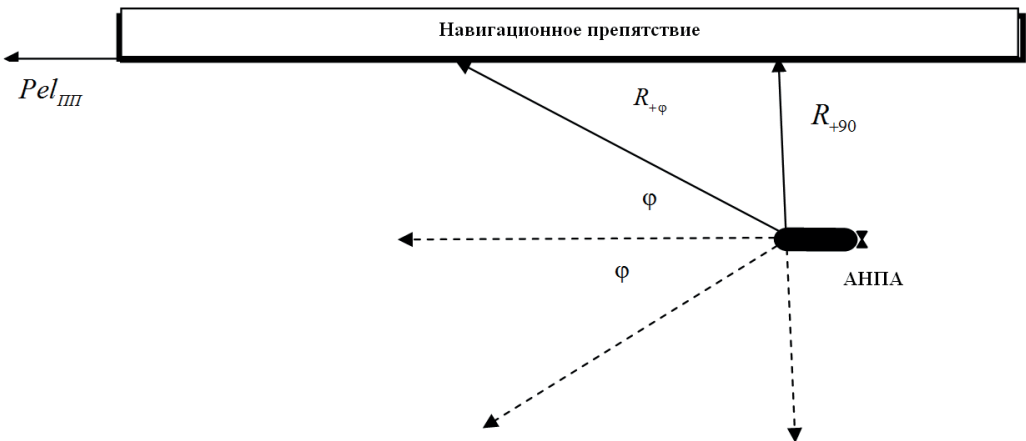


Рис. 7. Схематическое изображение движения АНПА вдоль протяженного препятствия

6. Управление движением АНПА вдоль препятствия корректируется исходя из двух условий:

- курс АНПА должен быть близок к текущему значению $P\tilde{e}I_{III}^{(i)}$;
- расстояние АНПА от препятствия не должно быть меньше минимально допустимого.

7. Движение вдоль препятствия должно осуществляться до тех пор, пока на всех пяти курсовых углах будет зафиксировано отсутствие эхосигналов от препятствия (рис. 8). После этого АНПА прежним курсом должен пройти некоторую заданную дистанцию, а затем лечь на курс движения в целевую точку (рис. 9).

8. Если после поворота препятствие еще будет наблюдаться на носовых курсовых углах (наиболее вероятно – по борту поворота), нужно повторить действия, описанные на шагах 5 и 6. И так до тех пор, пока акустический контакт с препятствием не будет окончательно потерян.

Особо необходимо отметить случай, когда АНПА в силу погрешностей навигации за неподвижное препятствие сочтет береговую черту материка. Если действовать в соответствии с описанным алгоритмом, обход такого «препятствия» будет продолжаться до исчерпания запаса электроэнергии. Чтобы этого не произошло, следует разумно ограничить время обхода. По истечении установленного срока АНПА должен выполнить обсервацию любым доступным способом и скорректировать направление дальнейшего движения.

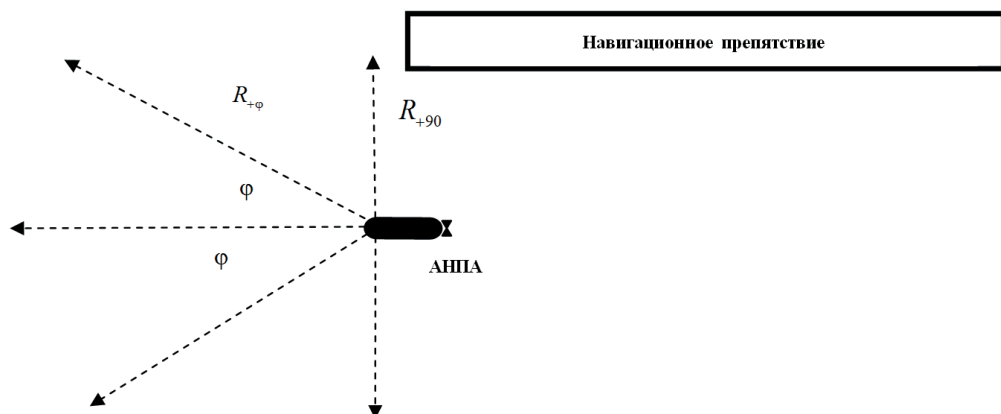


Рис. 8. Схематическое изображение потери акустического контакта с протяженным препятствием

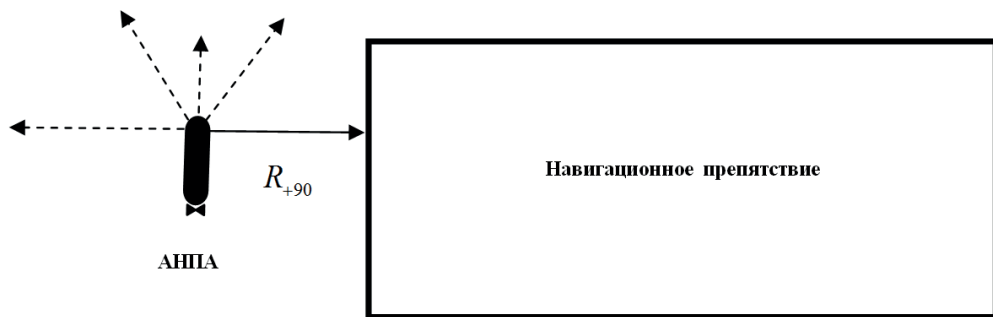


Рис. 9. Схематическое изображение завершения обхода протяженного препятствия

Для подтверждения эффективности приведенного алгоритма было проведено моделирование, условия и результаты которого показаны на рис. 10. Фигура черного цвета представляет собой протяженное препятствие, имитирующее берег, изрезанный фиордами. Синей линией отмечен маршрут движения АНПА в соответствии с алгоритмом, описанным в [1, 7], красной – маршрут в соответствии с алгоритмом, предложенным в данной работе. Последний, как показало моделирование, позволяет сократить время обхода протяженного препятствия в 4,7 раза благодаря прогнозу ориентации лицевой части препятствия, который дает возможность двигаться, во-первых, по более плавной траектории, во-вторых, с относительно большой скоростью (в нашем случае 4 уз.). В отличие от этого при движении в соответствии с описанным в [1, 7] алгоритмом АНПА, не имея прогноза и обходя каждую выпуклость препятствия, движется по петляющей траектории и при приближении к препятствию вынужден уменьшать скорость до 0,5-1 уз., чтобы выполнить поворот, избежав столкновения.

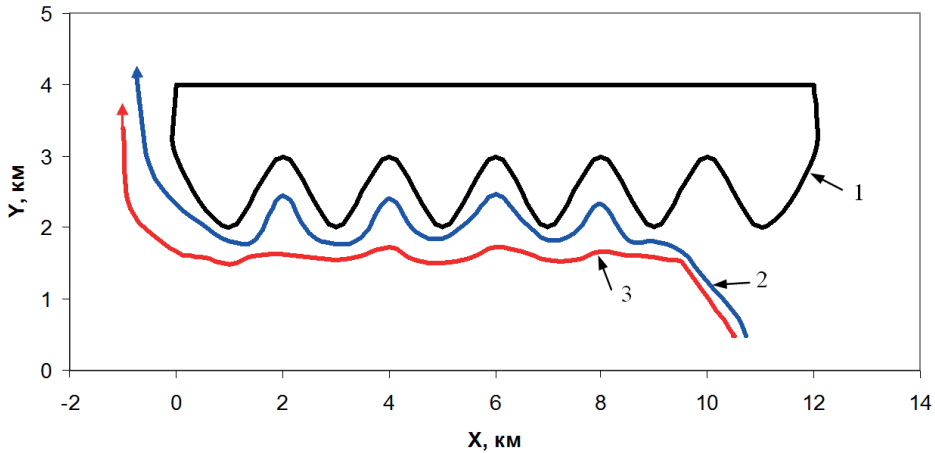


Рис. 10. Результаты моделирования обхода протяженного препятствия в форме берега, изрезанного фиордами:

1 – береговая черта; 2 – маршрут движения АНПА в соответствии с алгоритмом, описанным в [1, 7];
3 – маршрут движения АНПА в соответствии с алгоритмом, предложенным в настоящей работе

Заключение

Обеспечение безопасности плавания является одной из основных задач, решаемых системой управления АНПА. Методам и алгоритмам решения этой задачи посвящено значительное число научных работ. Их анализ показал, что абсолютное большинство предложенных методов и алгоритмов ориентировано на применение в легких АНПА, оборудованных высокочастотными впередсмотрящими гидролокаторами с дальностью обнаружения препятствий, не превышающей 100 м, и узким (зачастую однолучевым) сектором обзора. Ввиду этого задача обхода неподвижного препятствия для таких АНПА сводится к выбору скорости, обеспечивающей осуществление маневра расхождения с препятствием на безопасном расстоянии. В результате обход неподвижного препятствия легким АНПА выполняется путем огибания каждого выпуклого либо вогнутого фрагмента препятствия.

В данной статье предложен новый подход к построению алгоритма обхода протяженного препятствия, ориентированный на применение в АНПА тяжелого класса. Он заключается в оценке по данным гидролокатора с большой дальностью обнаружения препятствия и широким сектором обзора пространственной ориентации и конфигурации лицевой части препятствия и выборе движения АНПА вдоль лицевой части препятствия по траектории, наиболее близкой к прямой линии, на большем удалении от нее. Это позволяет безопасно обходить препятствия на высокой скорости и тем самым сократить время обхода до минимального.

В статье описан также алгоритм расхождения с точечным (подвижным либо неподвижным) препятствием на безопасном расстоянии в вертикальной и/или горизонтальной плоскости, который учитывает возможности гидроакустических средств наблюдения, установленных на АНПА тяжелого класса, определять координаты и параметры движения точечного препятствия в текущих гидроакустических условиях в районе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.** Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.
2. **Наумов Л.А., Илларионов Г.Ю., Лаптев К.З., Бабак А.В.** К вопросу о принципах планирования и особенностях формирования глобальных маршрутов автономных подводных роботов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ. 2015. 219 с.
3. **Лаптев К.З., Илларионов Г.Ю.** Что может помешать подводному мореходству автономного необитаемого подводного аппарата // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. С. 138–146.
4. **Инзарцев А.В., Багницкий А.В.** Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // Подводные исследования и робототехника. 2016. №2 (22). С.25–35.
5. **Багницкий А.В., Инзарцев А.В.** Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 17–24.
6. **Пашкевич И.В., Гриненков А.В., Конохов Г.В. и др.** Особенности реализации аварийной подсистемы АНПА при использовании мультиагентной технологии в его системе управления // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 21–24 сентября 2020. С. 276–285.
7. **Инзарцев А.В., Багницкий А.В.** Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всерос. науч.- техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6). Владивосток, 2015. С. 450–454.
8. **Тусеева И.Б., Тусеева Д.Б., Ким Юн-Ги.** Алгоритм динамического окна для навигации автономных подводных аппаратов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. №3. С. 67–77.
9. **Galarza, C., Masmitja, I., Prat, J., Gomariz, S.,** Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV, *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 32–37.
10. **Lin, C., Wang, H., Yuan, J., Yu, D., Li, C.,** An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance // *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 120–133.
11. **Fox, D., Burgardt, W., Thrun, S.,** The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1995.
12. **Sami, A., Ayman, M.M., Brisha, M.,** Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 43–50.
13. **Galarza, C., Masmitja, I., González, J., Prat, J., Gomariz, S., Del Rio, J.,** Design obstacle detection system for AUV Guanay II.A, Sixth International Workshop on Marine Technology, Cartagena, 2015, pp. 15–18.
14. **Hromatka, M.,** A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs, Honors Theses, 2013, Paper 13. URL: http://digitalcommons.csbsju.edu/honors_theses/13.
15. **Evans, J., Patrón, P., Smith, B., Lane, D.M.,** Design and evaluation of a reactive and deliberative collision avoidance and escape architecture for autonomous robots, *Autonomous Robots*, 2008, vol. 24, no 3, pp. 247–266.
16. **Chiew, S.T.,** A collision avoidance system for autonomous underwater vehicles, Honors Theses, University of Plymouth, 2006. URL: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258>.
17. **Liu, S., Wei, Y., Gao, Y.,** 3D path planning for AUV using fuzzy logic, *Computer Science and Information Processing (CSIP)*, 2012, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6308925>.
18. **Jane's unmanned maritime vehicle**, 2019–2020, Ed. Kelvin Wong, IHS Markit, 2020.
19. **Аполлонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 34–42.
20. **Акустика океана** / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974.
21. **Справочник штурмана** / под ред. В.Д. Шандабылова. М.: Воениздат, 1968.

22. Захаров В.Л., Машошин А.И. Методический аппарат для обоснования требований к точности определения координат и параметров движения целей по информации гидроакустического комплекса подводной лодки // Морская радиоэлектроника. 2011. № 4 (38). С. 36–39.
-

Bykova, V.S., Mashoshin, A.I., and Pashkevich, I.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

Safe Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 1 (112), pp. 97–110.

Abstract. Two safe navigation algorithms for autonomous underwater vehicles are described: algorithm for avoidance of point obstacles including all the moving underwater and surface objects, and limited size bottom objects, and algorithm for bypassing extended obstacles such as bottom elevations, rough lower ice edge, garbage patches. These algorithms are developed for a control system of a heavyweight autonomous underwater vehicle.

Key words: autonomous underwater vehicle, underwater obstacle, underwater static obstacle, bypassing algorithm.

Материал поступил 03.11.2020