

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 629.58

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-6-18

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПУТИ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ*

Рассматривается задача безопасного движения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в условиях возникновения неподвижных препятствий. Традиционно информация о препятствии формируется по мере приближения АНПА к препятствию, и по ней система управления АНПА принимает решение о параметрах дальнейшего движения АНПА (курс, скорость, глубина). Целью работы явилось определение пространственного пути обхода препятствия на основе определения геометрической формы и размеров препятствия по данным цифровых карт. В работе предложен метод определения пространственного 3D-пути обхода препятствия, использующий полную информацию о геометрической форме и размерах препятствия, полученную на основе дополнения данных средств освещения обстановки данными цифровых батиметрических карт районов, через которые пролегает маршрут АНПА, а также – цифровых физических карт районов земной поверхности с указанием мелких островов, выступающих на морскую поверхность. Изобаты батиметрической карты построены по измерениям в узлах сетки, покрывающей рассматриваемый район, шаг сетки превышает сотни метров. Для оценки вероятности возникновения аномалий рельефа дна между узловыми точками сетки, представляющими опасность для движения АНПА, предложено использовать метод нечетко-вероятностного анализа. По узловым точкам, покрывающим препятствие, вычисляется двумерная автокорреляционная функция, формируются значения лингвистических переменных. По этим переменным сформированы продукционные правила и с их использованием определена вероятность возникновения аномалий рельефа. Для определения кратчайшего расстояния имеющаяся сетка глубин в узловых точках препятствия представлена в виде ориентированного взвешенного графа: узлами графа являются узлы сетки с известными глубинами, ребрам назначены веса, равные пространственным расстояниям между узлами трехмерной сетки (широта, долгота, глубина). Разработанный алгоритм определения пути обхода препятствия заключается в определении конечной точки обхода на маршрутной траектории за препятствием и поиске кратчайшего пути обхода препятствия путем сравнения текущего рассматриваемого пути с полученными ранее. В случае превышения длины рассматриваемого пути в промежуточном узле сформированного ранее пути процесс рассмотрения текущего пути останавливается, и осуществляется переход к рассмотрению следующего пути. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что сокращение пути обхода по сравнению с традиционным подходом препятствия в рассмотренном примере составило 17%.

Автономный необитаемый подводный аппарат; батиметрическая карта; физическая карта; нечетко-вероятностный анализ; рельеф дна.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803, <https://rscf.ru/project/23-29-00803/>.

L.A. Martynova, M.B. Rosengauz

**METHOD FOR DETERMINING THE SPATIAL PATH OF AVOIDING
AN OBSTACLE BY AN AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER
VEHICLE**

The problem of safe movement of an autonomous underwater vehicle (AUV) in the presence of stationary obstacles is considered. Traditionally, information about an obstacle is generated as the AUV approaches the obstacle, and using it, the AUV control system makes a decision on the parameters of the AUV's further movement (course, speed, depth). The goal of the work was to determine the spatial path to bypass the obstacle based on determining the geometric shape and size of the obstacle according to digital maps. The paper proposes a method for determining a spatial 3D path to bypass an obstacle, using complete information about the geometric shape and size of the obstacle, obtained by supplementing the data from the means of illuminating the situation with data from digital bathymetric maps of the areas through which the AUV route runs, as well as digital physical maps of the areas of the earth. surfaces indicating small islands protruding onto the sea surface. The bathymetric map isobaths are constructed from measurements at grid nodes covering the area under consideration; the grid spacing exceeds hundreds of meters. To assess the probability of occurrence of bottom topography anomalies between grid nodes that pose a danger to the movement of AUVs, it is proposed to use the method of fuzzy probabilistic analysis. Based on the nodal points covering the obstacle, a two-dimensional autocorrelation function is calculated, and the values of linguistic variables are formed. Based on these variables, production rules were formed and, using them, the probability of occurrence of relief anomalies was determined. To determine the shortest distance, the existing depth grid at the node points of the obstacle is presented in the form of an oriented weighted graph: the graph nodes are grid nodes with known depths, the edges are assigned weights equal to the spatial distances between the three-dimensional grid nodes (latitude, longitude, depth). The developed algorithm for determining the path to bypass an obstacle consists in determining the end point of the bypass on the route trajectory behind the obstacle and finding the shortest path to bypass the obstacle by comparing the current path under consideration with those obtained previously. If the length of the path under consideration exceeds the length of the intermediate node of the previously formed path, the process of reviewing the current path stops, and the transition to the consideration of the next path is carried out. The results of the numerical experiments showed that the reduction in the path around the obstacle compared to the traditional approach in the considered example was 17%.

Autonomous underwater vehicle; bathymetric map; physical map; fuzzy probabilistic analysis; bottom topography.

Введение. При выполнении маршрутного задания автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) дальнего плавания на его пути могут возникнуть препятствия, которое АНПА в целях собственной безопасности необходимо обойти. Сложность решения системой управления АНПА [1] задачи выбора маршрута обхода препятствия заключается в том, что из-за ограниченности сектора обзора средств освещения обстановки АНПА отсутствует возможность оценки размеров препятствия и его геометрической формы, что не позволяет выбрать путь обхода препятствия по критерию, например, кратчайшего пути или минимального расхода энергоресурса. И выбор «наугад» одного из направлений обхода способен привести к неоправданной потере времени или расходу энергоресурса. Наличие у АНПА полной информации о геометрической форме и размерах препятствия существенно упростило бы задачу обоснованного выбора пути обхода. Для получения полной информации о препятствии требуется обследование препятствия со всех сторон, прежде чем будет определена его форма и геометрические размеры, позволяющие выбрать наиболее подходящий путь обхода. Обследование со всех сторон также приводит к перерасходу энергоресурса и временным затратам. В связи с этим актуальной является задача оценки размеров и положения препятствия за кратчайшее время с тем, чтобы обоснованно выбрать наилучший путь обхода препятствия по временными или энергетическим критериям. Этим определяется актуальность исследований.

Традиционно информация о препятствии формируется по мере приближения к нему АНПА, и по ней принимается решение о параметрах дальнейшего движения АНПА по курсу, скорости, глубине (реакционный подход). Задача обхода препятствий в морской среде рассматривалась ранее как в зарубежных публикациях [2–9], так и в отечественных, например, в [10–17]. Так, в [2] представлена разработка алгоритма обхода препятствий для АНПА на основе нечеткой реактивной архитектуры для различных скоростей движения аппарата. В [3] основное внимание уделено онлайн-планированию обхода препятствий. Для улучшения автономной способности и интеллекта при планировании обхода препятствий предлагается рекуррентная нейронная сеть со сверткой. В [4] описывается подход динамического окна к реактивному предотвращению столкновений, который хорошо подходит для АНПА, движущихся с высокой скоростью. В [5] предложен алгоритм обхода препятствий по трехмерной траектории. В [6] рассмотрено предотвращение столкновений с АНПА путем использования нечеткой логики для определения подходящего маневра уклонения после обнаружения возможного столкновения. В [7] предложен подход к построению архитектуры системы управления АНПА для предотвращения столкновений и движения АНПА в неструктурированных средах. Подход сочетает в себе как реакционный, так и совещательный компоненты. В [8] предложена практическая система предотвращения столкновений АНПА с препятствием на основе алгоритма быстрого изучения случайного дерева. В [9] предложен новый алгоритм планирования пути АНПА в трехмерном заранее неизвестном пространстве, основанный на нечеткой логике, в котором задача трехмерного планирования пути разбивается на две независимые задачи планирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. В отечественных публикациях [10, 11] заложен фундамент и методическая основа выбора направления обхода препятствия, в [12, 13] показана работа алгоритмов принятия решения и обхода препятствий и сформированы условия их применения. В [14] указано на необходимость тщательного планирования маршрута в обход препятствий и учета плана исследований и возможностей технических средств АНПА при обходе препятствий. Так, в [15] описаны препятствия, с которыми может столкнуться АНПА дальнего радиуса действия. В [16] рассмотрены вопросы формирования поведения АНПА, в том числе и при обходе препятствий. В [17] предложена доработка алгоритма динамического окна, впервые предложенного в [4], ориентированного на морскую среду, расширенного до метода манипулирования аппаратом в трехмерном пространстве.

Из обзора публикаций следует, что априорному получению информации о размерах и форме препятствия перед тем, как формировать маршрут его обхода, не уделено должного внимания.

Целью работы явилось получение полной информации о размерах и форме препятствия, и на основе этой информации – выработка кратчайшего пути обхода препятствия, приводящего к экономии энергоресурса.

Постановка задачи. Пусть:

- ♦ АНПА выполняет маршрутное задание в заданном районе; в некоторый момент времени на пути АНПА его средства освещения обстановки обнаруживают препятствие;

- ♦ АНПА имеет информацию по цифровой батиметрической карте о глубинах в заданном районе в узлах сетки с определенным шагом;

- ♦ АНПА имеет цифровую физическую карту района, через который проходит маршрут АНПА, с указанием положения береговой черты, островов, выступающих на морскую поверхность скал.

Необходимо: оценить геометрическую форму препятствия и определить кратчайший путь его обхода.

Предлагаемое решение. Для получения полной информации о препятствии предлагается результаты обследования АНПА средствами освещения обстановки в дополнить априорно известной информацией в виде батиметрической цифровой

карты рельефа дна и физической карты мира с указанием выступающих над поверхностью моря островов и скал. Опыт встраивания в систему управления АНПА цифровых карт рельефа дна имеется при реализации SLAM-технологии [18].

Опасность обхода препятствия заключается в ошибочном выборе направления движения, при котором АНПА приходится неоправданно обходить его протяженным путем, в то время как при обходе с другой стороны путь мог оказаться значительно короче. В связи с этим при обнаружении впереди по курсу препятствия первое, что предлагается сделать – это сопоставить возникшее перед АНПА препятствие с обозначенными на карте: если перед АНПА возникло крупное препятствие, выступающее на морской поверхности, то оно, наверняка, обозначено на физической цифровой карте района, через который проходит маршрут АНПА. Это дает возможность системе управления АНПА получить полную информацию об обнаруженном препятствии и обоснованно выбрать путь обхода препятствия. Если же такого препятствия на карте нет, то, следовательно, оно мелкое, и выбор направления его обхода не может существенно повлиять на протяженность пройденного при обходе пути.

Однако даже при обходе малоразмерного препятствия в публикациях [11, 16] рекомендовано попытаться обойти его сначала в вертикальной плоскости, то есть сверху. Опасность в данном случае возникает из-за того, что препятствие может возвышаться над морской поверхностью, и попытка обойти его сверху приведет к неоправданному перерасходу энергоресурса и потере времени, чтобы понять, что сверху обойти его не удастся. В связи с этим для исключения такой ситуации предлагается воспользоваться данными физической карты и данными аэрофотосъемки морской поверхности с указанием возвышающихся над морской поверхностью скал и островов. И если оказавшееся перед АНПА препятствие возвышается над морской поверхностью, то, очевидно, что нет смысла пытаться обойти его сверху.

В любом случае при обходе сверху или сбоку малоразмерного препятствия целесообразно найти кратчайший пространственный путь обхода (далее – 3D-путь). Для этого целесообразно воспользоваться данными батиметрических карт. Батиметрическая карта отображает подводный рельеф дна при помощи изобат, дополненных отметками глубин (рис. 1). Изобаты построены по измерениям в узлах сетки, покрывающей рассматриваемый район.

К сожалению, существующие карты рельефа дна основаны на измерениях в узлах сетки с шагом, превышающим сотни метров, например, одна из самых точных батиметрических карт представлена на сайте NOAA (США) [19] (рис. 1). Такую точность нельзя считать удовлетворительной для получения информации о препятствии.

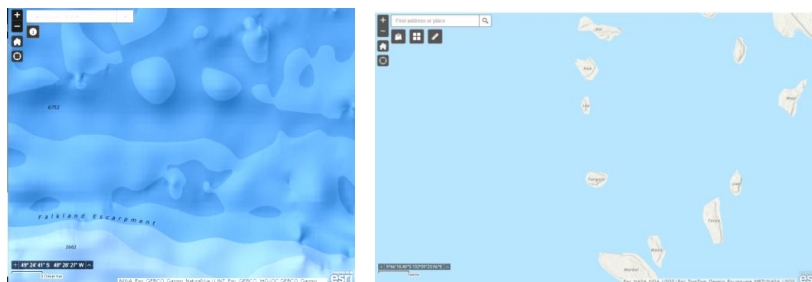


Рис. 1. Пример батиметрической карты с изобатами (слева) и физической карты с мелкими островами (справа) [19]

Очевидно, что движение АНПА при полностью известных данных о препятствии, но на грубой сетке, должно происходить по узлам, как точкам с наиболее точной информацией о глубинах. Однако для перехода между узлами необходимо

определить направление безопасного движения АНПА. Для этого требуется детализация цифровой карты рельефа дна. Для оценки безопасного движения АНПА между узлами достаточно оценить отсутствие аномалий рельефа дна между узлами сетки. Под аномалиями рельефа в данном случае понимается резкий перепад глубин и глубины, существенно отличающиеся от значений в узловых точках, что может представлять для АНПА опасность. Для оценки вероятности возникновения аномалий рельефа дна между узловыми точками используем метод нечетко-вероятностного анализа.

Оценка аномалий рельефа дна с использованием нечетко-вероятностного анализа. Наличие батиметрической карты рельефа дна при помощи изобат, дополненных отметками глубин (рис. 1), означает, что по району имеется информация по количеству профилей N , общему количеству точек по каждому профилю n , значениям глубины f_{ki} на k -ом профиле в i -ой точке. Тогда для точки, смещенной между профилями съемки p ($p=0, \pm\Delta y, \pm 2\Delta y, \dots$) и смещением между точками по профилю m ($m=0, \pm\Delta x, \pm 2\Delta x, \dots$), двумерная автокорреляционная функция определяется выражением [20]:

$$R(p, m) = \frac{1}{N - |p|} \cdot \frac{1}{n - |m|} \sum_{k=1}^{N - |p| - |m|} \sum_{i=1}^{n - |m|} f_{ki} f_{k+p, k+m} \quad (1)$$

Результаты изменения двумерной автокорреляционной функции позволяют оценить характер изменения морского дна на выбранном участке поля глубин.

Для учета наличия аномалий дна, образованных малыми формами рельефа, применим методы нечетко-вероятностного анализа. Для оценки вероятности аномалий рельефа дна между узлами в зависимости от дискретности съемки с учетом неопределенности количественного описания данных – используем нечеткую продукционную модель. Рельеф с вероятными аномалиями между узловыми точками представляет собой опасность для движения АНПА и может быть классифицирован как запретная зона для движения АНПА между парой узловых точек.

Для этого опишем положение каждой пары узловых точек морской батиметрической цифровой карты тремя лингвистическими переменными:

- ◆ коэффициент корреляции между парой точек (высокий/низкий);
- ◆ расстояние между парой узловых точек (малое/большое);
- ◆ угол наклона рельефа дна между парой узловых точек.

Для определения наличия запретных зон применим упрощенный, что позволяет сразу определить вероятности наличия аномалий рельефа [21]. Введем следующие лингвистические переменные, описывающие каждую пару узловых точек морской цифровой карты:

- ◆ коэффициент корреляции между парой точек (K), вычисляемый с использованием выражения (1);
- ◆ расстояние между парой узловых точек (D), определяемое по данным батиметрической карты;
- ◆ направление наклона рельефа дна между парой узловых точек (H), определяемое разностью глубин с батиметрической карты между этими точками.

Оценим влияние параметров пары узловых точек на вероятность аномалии рельефа узловыми точками. Для этого введем нечеткость (фазификацию) согласно алгоритму Мамдани [21]:

- ◆ если $K < 0,35$, то $K =$ «низкий», в противном случае $K =$ «высокий»;
- ◆ если $D < 50$ м, то $D =$ «малое», в противном случае $D =$ «большое»;
- ◆ если H направлен вниз ($\Delta H = H_i - H_{i+1} \leq 0$), то $H =$ «вниз», в противном случае $H =$ «вверх».

Присвоим лингвистическим переменным значения:

- ◆ $K=0$ – «низкий», $K=1$ – «высокий»;

- ◆ $D=0$ – «малое», $D=1$ – «большое»;
- ◆ $H=0$ – «вниз», $H=1$ – «вверх».

Определим продукционные правила Π_1 – Π_8 , связывающие лингвистические переменные, т.е. построим базу правил. Каждое правило состоит из антецедента (часть ЕСЛИ...) и консеквента (часть ТО...). В нашем случае при использовании упрощенного алгоритма нечеткого вывода продукционные правила, описывающие все возможные сочетания лингвистических переменных, имеют следующий вид:

- Π_1 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «малое» И H = «вниз», то $P_1 = 0,45$;
- Π_2 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «большое» И H = «вниз», то $P_2 = 0,25$;
- Π_3 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «большое» И H = «вверх», то $P_3 = 0,15$;
- Π_4 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «малое» И H = «вверх», то $P_4 = 0,33$;
- Π_5 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «малое» И H = «вниз», то $P_5 = 0,20$;
- Π_6 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «малое» И H = «вверх», то $P_6 = 0,17$;
- Π_7 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «большое» И H = «вниз», то $P_7 = 0,32$;
- Π_8 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «большое» И H = «вверх», то $P_8 = 0,38$,

где $P_j, j=1, \dots, 8$ – вероятность наличия локальных аномалий рельефа (определяются экспертным путем), представляющих для АНПА потенциальную опасность. Далее определяем степень принадлежности всего антецедента правила с помощью операторов логического MIN для связки И или оператора логического MAX для связки ИЛИ. Такая операция отрабатывается для каждого правила из базы правил.

Покажем работу этого алгоритма на примере продукционного правила Π_1 . На рис. 2 изображены функции принадлежности лингвистических переменных. Для каждой лингвистической переменной представлена зависимость значения лингвистической переменной μ от параметров K, D, H соответственно. На каждом графике горизонтально-убывающие функции слева означают значения переменных «низкий» для K , «малый» для D , «вниз» для H , соответственно. Правые горизонтально-возрастающие линии справа означают значения переменных «высокий» для K , «большое» для D , «вверх» для H , соответственно.

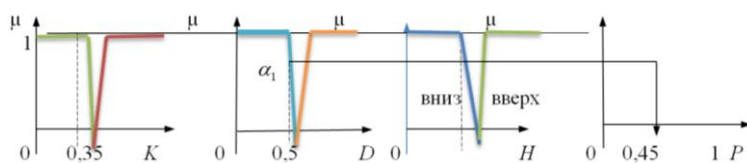


Рис. 2. Функции принадлежности лингвистических переменных

Для определения вероятности аномалий рельефа дна между двумя точками определим значения K, D, H : K – из выражения (1), D и H – из батиметрической цифровой карты. Пусть $K=0,30$; $D=0,45$; $H \leq 0$. По графикам получаем их значения: для $K=0,30$ $\mu=1,0$, для $D=0,45$ $\mu=0,65$, для $H \leq 0$ $\mu=0$. Берем наименьшее значение $\mu=0,65$ и назначаем его значение – уровню «отсечения» α , получаем $\alpha_1 = 0,65$ – для первого правила Π_1 . И когда мы по уровню 0,65 провели горизонталь, получили 0,45, так как у нас так задано продукционными правилами.

Аналогично выполняем указанные выше действия для всех оставшихся 7 правил:

- ◆ для правила Π_2 – $P_2 = 0,25$; уровень отсечения $\alpha_2 = 0,40$;
- ◆ для правила Π_3 – $P_3 = 0,15$; уровень отсечения $\alpha_3 = 0,25$;
- ◆ для правила Π_4 – $P_4 = 0,33$; уровень отсечения $\alpha_4 = 0,55$;
- ◆ для правила Π_5 – $P_5 = 0,2$; уровень отсечения $\alpha_5 = 0,15$;
- ◆ для правила Π_6 – $P_6 = 0,17$; уровень отсечения $\alpha_6 = 0,35$;

- ◆ для правила $P_7 - P_7 = 0,32$; уровень отсечения $\alpha_7 = 0,45$;
- ◆ для правила $P_8 - P_8 = 0,38$; уровень отсечения $\alpha_8 = 0,60$.

Тогда вероятность локальных аномалий рельефа, определяется по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^8 \alpha_i P_i / \sum_{i=1}^8 \alpha_i$$

Подставляя определенные выше значения в эту формулу, получаем, что вероятность пропуска локальных аномалий рельефа между двумя узлами составляет 0,316.

Продельвая подобные процедуры с каждой парой точек $(i, i+1)$ карты глубин рассматриваемого района, определяем вероятности P_i аномалий рельефа между узловыми точками. При высокой вероятности аномалий рельефа, например, выше 0,25, пространство между узловыми точками для АНПА могут представлять опасность при движении, в связи с чем целесообразно выбрать путь до другой узловой точки.

Таким образом, в результате применения метода нечетко-вероятностного анализа получены вероятности P_i возникновения аномалий рельефа дна в промежутках между всеми узловыми точками рассматриваемого района с препятствием.

После получения полной и детальной информации о геометрической форме возникновения перед АНПА препятствия определим кратчайший 3D-путь его обхода.

Определение кратчайшего 3D-пути обхода препятствия. По результатам определения вероятностей возникновения аномалий рельефа дна сформируем запретные для АНПА участки между узловыми точками. Для этого зададимся пороговым значением вероятности безопасного движения между узлами P_z . Если вероятность аномалии рельефа выше пороговой вероятности P_z , то считаем такой путь опасным для движения АНПА и при определении пути обхода препятствия этот участок исключаем из рассмотрения.

Если же вероятность аномалии рельефа ниже порогового уровня, то такой участок между узловыми точками берем в обработку как потенциально безопасный участок для движения АНПА при обходе препятствия.

После определения безопасных для АНПА путей между узловыми точками – представим имеющуюся сетку глубин в виде ориентированного взвешенного графа: узлами графа являются узлы сетки глубин, ребрами – расстояния между узлами. Назначив ребрам веса, равные расстояниям между узлами трехмерной сетки (широта, долгота, глубина). Такой вариант формирования графа позволяет формализовать задачу как задачу поиска кратчайшего пути в графе. Традиционно для определения кратчайшего пути в графе используют алгоритм Дейкстры. Поскольку он предназначен для решения плоской задачи, то в связи с этим преобразуем трехмерную сетку узлов в двумерную, назначив расстояниям между узлами веса, равные фактическим расстояниям между узлами сетки глубин с учетом глубины каждого узла.

В таком виде двумерного графа для поиска кратчайшего пути можно использовать алгоритм Дейкстры, однако эвристический характер алгоритма не позволяет гарантировать определение кратчайшего пути, что может привести к увеличению времени обхода препятствия и перерасходу электроэнергии АНПА. В связи с этим разработан алгоритм обхода препятствия по 3D-траектории, который лег в основу алгоритма управления АНПА при обходе препятствия.

Предварительно определим положение точки, в которой маршрут обхода препятствия должен закончиться: обязательным условием является то, что эта точка должна лежать на маршрутной траектории за препятствием, но совсем необязательно эта точка должна являться диаметрально противоположной точкой (на рис. 3 траектория обозначена линией желтого цвета). После обхода части препятствия возможно движение АНПА «по касательной» к границе препятствия по направлению к линии заданного маршрута (на рис. 3 траектория показана линией зеленого цвета).

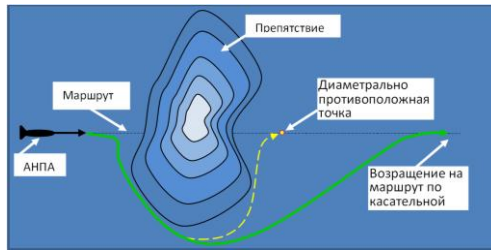


Рис. 3. Направление возвращения на маршрут после обхода препятствия

В связи с отказом от применения эвристических алгоритмов поиска кратчайшего пути при проведении исследований специально разработан алгоритм перебора всех возможных вариантов маршрута обхода, отличающийся от известного «метода простого перебора». Отличие заключается в том, что поскольку вероятности между каждой парой точек означают то, насколько можно доверять безопасному проходу АНПА между точками, то перебор осуществляем только среди тех путей, которые не подпадают под запрет.

Кроме того, при вычислении в каждом узле длины пути происходит постоянное сравнение вычисляемой в каждом узле протяженности текущего маршрута с протяженностью тех маршрутов, которые уже вычислены. И если в процессе формирования очередного маршрута в очередном узле оказалось, что протяженность рассматриваемого маршрута превысила протяженность ранее сформированного маршрута, то продолжение рассмотрения текущего маршрута становится бессмысленным, и осуществляется переход к рассмотрению следующего варианта маршрута. Такой подход приводит к экономии времени и вычислительных ресурсов по сравнению с применением «метода простого перебора».

Для тестирования предложенного алгоритма управления АНПА при обходе препятствия по 3D-траектории разработана математическая модель и ее программная реализация, с использованием которой проведены численные эксперименты.

Результаты численных экспериментов. Цель эксперимента заключается в оценке преимущества использования полной информации о форме и размерах препятствия для того, чтобы выбрать кратчайшую траекторию движения АНПА в обход препятствия. При проведении численного эксперимента сформированное препятствие представляло собой комбинированную геометрическую фигуру, состоящую из трех ярко выраженных частей: цилиндра большого радиуса в основании препятствия, цилиндра меньшего радиуса в середине и конуса, опирающегося основанием на верхнюю часть цилиндра. Верхушка конуса выступала над водой. Принимаем, что высота нижнего и среднего цилиндров совпадают между собой, высота конуса в 4 раза меньше (рис. 4), диаметр среднего цилиндра определяется высотой конуса и углом при его вершине.

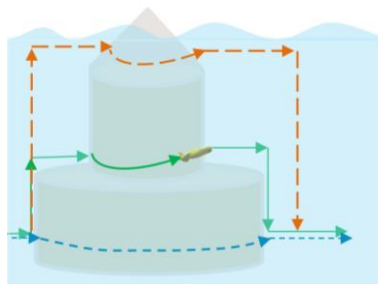


Рис. 4. Внешний вид препятствия

При проведении эксперимента перебирались различные траектории обхода препятствия и оценивалось, насколько кратчайшая траектория короче той, которая была бы выбрана в отсутствии полной информации о препятствии.

Начальная точка положения АНПА перед обходом препятствия расположена в нижней точке основания слева, как показано на рис. 4.

Рассмотрены следующие варианты обхода препятствия:

- ◆ обход вокруг нижнего цилиндра по дуге окружности;
- ◆ движение вертикально вверх вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра с выходом на горизонтальную его поверхность и последующим движением к основанию среднего цилиндра и дальнейшим обходом его по дуге окружности;
- ◆ движение вертикально вверх последовательно вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра, затем переход по горизонтали к среднему цилиндру и движение вертикально вверх вдоль боковой поверхности среднего цилиндра с последующим выходом к конусу и обходом по дуге окружности вокруг конуса.

Во всех случаях считалось, что после обхода АНПА заглубляется на первоначальную глубину, соответствующую маршрутному заданию.

Обозначим радиус нижнего цилиндра R , высоту нижнего и верхнего цилиндров H_1 и H_2 соответственно, высоту конуса $H_3=H_1/4$ и угол при вершине конуса α . Высота препятствия определяется выражением:

$$H_{ob} = H_1 + H_2 + H_3.$$

Расчет пути обхода препятствия в зависимости от глубины его обхода осуществлялся суммированием участков прохождения дуг, вертикалей и горизонталей, о которых сказано выше.

Длина дуги окружности вокруг нижнего цилиндра $L_1=\pi R$, длина вертикального участка пути до среднего цилиндра H_1 , длина дуги окружности вокруг среднего цилиндра $L_2=\pi r$, радиус основания конуса $r=H_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha$, этому же значению равен и радиус среднего цилиндра, длина пути обхода среднего цилиндра $L_2=\pi r$, длина участка обхода конуса зависит от глубины, на которой АНПА движется сначала по наклонной, а затем по дуге совершает обход верхней части конуса. Полный путь обхода препятствия определяется выражением:

$$L = 2(H_{ob} - h_a) + 2(R - h_a \operatorname{tg} \alpha) + \pi h_a \operatorname{tg} \alpha + 2(H_{ob} - h_a) / \cos \alpha.$$

При проведении численного эксперимента рассмотрено три варианта геометрической формы препятствия, отличающиеся углом при вершине конуса α : значение α принималось равным 30° , 45° и 60° .

Приняты следующие исходные данные: высота препятствия $H_{ob}=90$ м, высота нижнего цилиндра $H_1=40$ м, радиус нижнего цилиндра $R=75$ м, высота верхнего цилиндра $H_2=40$ м, радиус верхнего цилиндра $r=10$ м, высота конуса $H_3=10$ м. Глубина h_a движения АНПА отсчитывалась от основания препятствия и менялась в диапазоне $0 \div 90$ м. Полученные результаты протяженности проходимого при обходе препятствия пути представлены на рис. 5. Нулевая точка по оси абсцисс соответствует варианту, при котором АНПА обходит препятствие сбоку по дуге окружности без изменения глубины. При этом для всех трех вариантов пройденный путь составил 376 м. С изменением глубины обхода наблюдается сокращение пройденного пути за счет того, что выше по глубине препятствие резко сузилось в диаметре.

Из графиков, представленных на рис. 5, видно следующее.

1. Протяженность маршрута существенно зависит от формы препятствия: с увеличением угла при вершине конуса происходит увеличение радиуса верхней части препятствия и среднего цилиндра, в результате чего увеличивается протяженность пути обхода препятствия.

Так при увеличении угла при вершине конуса от 30° до 60° пройденный путь увеличился на 5%. В то же время обход цилиндра через вершину оказался короче пути по дуге окружности вокруг конуса на 1,5%.

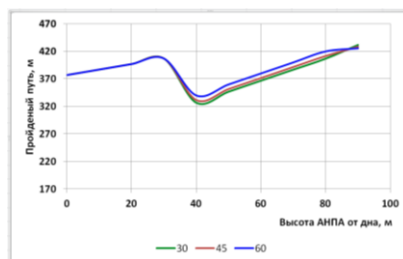


Рис. 5. Зависимость пройденного пути от глубины обхода препятствия

2. Переход от обхода препятствия на глубине движения АНПА – к обходу на других глубинах – привело к сокращению пройденного пути на 13%.

При всплытии АНПА для поиска пути обхода наиболее протяженным оказался путь обхода по верхней части нижнего цилиндра на глубине около 40 м. По сравнению с ним сокращение пути за счет рассмотрения различных альтернативных вариантов глубин и маршрутов обхода составил 17% при движении на глубине 40 м. Кратчайшим путем при этом оказался путь, включающий в себя участок всплытия вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра, движение параллельно горизонтальной поверхности нижнего цилиндра и обход среднего цилиндра по окружности, затем движение параллельно горизонтальной поверхности нижнего цилиндра и заглубление АНПА до первоначальной глубины поиска.

Заключение. В работе предложен метод определения кратчайшего 3D-пути обхода препятствия автономным необитаемым подводным аппаратом, предназначенным для преодоления значительных расстояний. Метод включает в себя использование текущих данных системы освещения обстановки, данных навигационной системы, данных о препятствии по батиметрической карте, данных о возвышении препятствия над морской поверхностью по данным физической карты мира.

Метод включает в себя процедуры:

- ♦ определения вероятности аномального рельефа между узлами сетки батиметрической карты – для оценки возможности безопасного прохода АНПА между соседними узлами;
- ♦ определения кратчайшего 3D-пути обхода препятствия на основе поиска кратчайшего пути в графе усовершенствованным методом простого перебора возможных вариантов обхода.

Предложенный подход к использованию батиметрической и физической цифровых карт для получения наиболее полной информации о геометрической форме и размерах препятствия позволил определить кратчайшего 3D-пути для обхода препятствия. При этом сокращение пути по сравнению с традиционным подходом в рассмотренном примере составило 17%. Этот факт позволяет считать целесообразным реализацию предложенного метода в системе управления АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.
2. Lin C., Wang H., Yuan J., Yu D., Li C. An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance // IEEEJ.Ocean. Eng. –2019. – Vol. 44. – P. 120-133.
3. Fox D., Burgardt W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance // IEEE robotics and Automation Magazine. – 1995.

4. 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, – P. 43-50.
5. Hromatka M. A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs // Honors Theses. – 2013. – Paper 13. – Свободный режим доступа: http://digitalcommons.csbsju.edu/honors_theses/13 (дата обращения: 25.08.2023).
6. van den Burg, 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. – P. 247-266.
7. Chiew S.T. A collision avoidance system for autonomous underwater vehicles // Honors Theses. University of Plymouth. – 2006. – Свободный режим доступа: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258> (дата обращения: 25.08.2023).
8. Liu S., Wei Y., Gao Y. 3D path planning for AUV using fuzzy logic // Computer Science and Information Processing (CSIP). – 2012. – Свободный режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6308925> (дата обращения: 25.08.2023).
9. Пилюхов В.Х. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями. – М.: Физматлит, 2015. – 300 с.
10. Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. – 2021. – Т. 29, № 1 (112). – С. 97-110.
11. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПМО-6). – Владивосток, 2015. – С. 450-454.
12. 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.
13. Наумов Л.А., Илларионов Г.Ю., Лантес 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. – 2015. – 219 с.
14. Лантес К.З., Илларионов Г.Ю. Что может помешать подводному мореходству автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2017. – С. 138-146.
15. 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.
16. 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.
17. Титов Р.У., Моторин А.В. Алгоритмы совместной навигации и картографирования, построенные на основе процедур частичного аналитического интегрирования // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 2. – С. 126-129.
18. Карты NOAA. – Свободный режим доступа: <https://www.charts.noaa.gov/InteractiveCatalog/nrnc.shtml> (дата обращения: 25.08.2023).
19. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учебник для ВУЗов. – М.: Недра. – 1986. – С. 122-123.
20. Амосов О.С. Интеллектуальные информационные системы. Нейронные сети и нечеткие системы. – Комсомольск-на Амуре: Комсом.-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2006. – 106 с.

REFERENCES

1. Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.I. Algoritmy, realizuyemye integrirovannoy sistemoy upravleniya ANPA [Algorithms implemented by the integrated AUV control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 50-58.
2. 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.
3. 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.

4. Fox D., Burgardt W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1995.
5. 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.
6. Hromatka M. A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs, *Honors Theses*, 2013, Paper 13. Available at: http://digitalcommons.csbsju.edu/honors_theses/13 (accessed 25 August 2023).
7. Evans J., 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.
8. Chiew S.T. A collision avoidance system for autonomous underwater vehicles, *Honors Theses*. University of Plymouth, 2006. Available at: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258> (accessed 25 August 2023).
9. Liu S., Wei Y., Gao Y. 3D path planning for AUV using fuzzy logic, *Computer Science and Information Processing (CSIP)*, 2012. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6308925> (accessed 25 August 2023).
10. Pshikhopov V.Kh. Intellectual'noe planirovanie trayektoriy podvizhnykh ob'yektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], Moscow, Fizmatlit, 2015, 300 p.
11. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. Safe navigation algorithm for autonomous underwater vehicles, *Gyroscopy and Navigation*, 2021, Vol. 12, No 1, pp. 86-95.
12. Inzartsev A.V., Bagnitsky A.V. Algoritmy obkhoda lokal'nykh donnykh ob'yektov dlya avtonomnogo podvodnogo robota [Algorithms for bypassing local bottom objects for an autonomous underwater robot], *Shestaya Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Tekhnicheskiye problemy osvoeniya mirovogo okeana» (TPOMO-6)* [Sixth All-Russian. scientific-technical conf. "Technical problems of the development of the world ocean" (TPOMO-6)]. Vladivostok, 2015, pp. 450-454.
13. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnyye robototekhnicheskiye komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications]. Vladivostok: Dalnauka, 2018, 368 p.
14. Naumov L.A., Illarionov G.Yu., Laptev K.Z., Babak A.V. K voprosu o printsipakh planirovaniya i osobennostyakh formirovaniya global'nykh marshrutov avtonomnykh podvodnykh robotov [On the issue of planning principles and features of the formation of global routes of autonomous underwater robots], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], Issue 11: in 2 parts. Part 2. Tula: Tula State University Publishing House, 2015, 219 p.
15. Laptev K.Z., Illarionov G.Yu. Chto mozhet pomeshat' podvodnomu morekhodstvu avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata [What can interfere with the underwater navigation of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Sb. materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «er spektivnyye sistemy i zadachi upravleniya»* [Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Advanced Systems and Control Problems"]. Rostov-on-Don: YuFU, 2017, pp. 138-146.
16. Inzartsev A.V., Bagnitsky A.V. Planirovanie i realizatsiya trayektoriy dvizheniya avtonomnogo podvodnogo robota pri vypolnenii monitoringa v akvatoriyakh razlichnykh tipov [Planning and implementation of motion trajectories of an autonomous underwater robot when performing monitoring in various types of water areas], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2016, No. 2 (22), p. 25-35.
17. Tuseeva I.B., Tuseeva D.B., Kim Yun-Gi. Algoritm dinamicheskogo okna dlya navigatsii avtonomnykh podvodnykh apparatov [Dynamic window algorithm for navigation of autonomous underwater vehicles], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2013, No. 3, pp. 67-77.
18. Titov R.U., Motorin A.V. Algoritmy sovmestnoy navigatsii i kartografirovaniya, postroyennye na osnove protsedur chastichnogo analiticheskogo integrirovaniya [Algorithms for joint navigation and mapping, built on the basis of partial analytical integration procedures], *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO* [Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University], Vol. 2, pp. 126-129.

19. Karty NOAA [NOAA Charts]. Available at: <https://www.charts.noaa.gov/InteractiveCatalog/nrnc.shtml> (accessed 25 August 2023).
20. Nikiitin A.A. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii: uchebnik dlya VUZov [Theoretical foundations of processing geophysical information: a textbook for universities], Moscow: Nedra, 1986, pp. 122-123.
21. Amosov O.S. Intellekturnye informatsionnye sistemy. Neyronnye seti i nechetkie sistemy [Intelligent information systems. Neural networks and fuzzy systems], Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur gos. tekhn. un-t, 2005, 106 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор А.И. Машошин.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Розенгауз Михаил Борисович – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; тел.: 89219411395; к.т.н.; с.н.с.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Rozengauz Mikhail Borisovich – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; phone: +79219411395; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-18-28

П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДЪЕМ ПОДВОДНОГО ГРУЗА

Целью исследования является разработка способа взаимодействия судна с подводным грузом для его приема и транспортировки. В статье представлены результаты создания комплекса подъема подводного груза на судно-носитель. Облик комплекса формировался на основе оценки возможных технических решений, проведения теоретических расчетов и моделирования. Выполнен анализ предыдущего опыта создания аналогов. Для стыковки с подводным грузом с судна-носителя опускается на четырех точках подвеса специальный приемный модуль, причем выбор сделан в пользу схемы тросового подвеса. Разработаны четыре механизма, составляющие основу комплекса – механизм подъема, механизм компенсации, механизм демпфирования и механизм фиксации. Основу механизма подъема составляют лебедки с электроприводом, использующие электрические асинхронные двигатели с векторным управлением. Канат механизма подъема заведен через полиспаст к грузу. Для компенсации возмущений, вызванных качкой судна-носителя, в разрыв канатной линии включена гидроневматическая система, которая парирует возникающие динамические нагрузки путем перемещения штоков гидроцилиндров. Механизм демпфирования поглощает энергию соударения платформы спускаемого модуля с корпусом судна-носителя в режиме причаливания. Механизм фиксации обеспечивает надежное крепление спускаемого модуля с подводным грузом или без него в походном положении с корпусом судна носителя. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором получена из обобщенной схемы, путем замыкания обмоток ротора накоротко. Предусмотрен частотный способ управления, за базовый вектор принят вектор потокосцепления ротора. В модели тросового подвеса учтена его деформация при движении в процессе эксплуатации. Модель механизма компенсации создана на основании адиабатического процесса в макроскопической системе, при котором система не обменивается теплотой с окружающим пространством. В ходе расчетов и моделирования параметры узлов и механизмов подобраны таким образом, что обеспечиваются технически реализуемые условия функционирования комплекса. При этом ограничены нагрузки на тросовую систему и исключены ее провисания, ход каретки компенсатора минимизирован. В результате был получен квазиравномерный подъем подводного груза с незначительными колебаниями скорости при качке судна-носителя.

Комплекс подъема подводного груза; подводный груз; судно-носитель; спускаемый модуль; механизм подъема; механизм компенсации; механизм демпфирования; механизм фиксации; качка; моделирование.