

МЕТОД ВЫБОРА ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОГО ПУТИ ОБХОДА СЛОЖНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ¹

Мартынова Л. А.², Павлов А. А.³

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

Для выбора пути обхода сложного препятствия разработан метод, основанный на данных батиметрических и физических карт Мирового океана. Определены условия применимости батиметрических и физических карт с мезорельефом для формирования пути обхода. Для перехода от макро- и мезорельефа к микрорельефу предложено использовать алгоритм Кригинга; на примере показана его работа. Для определения наиболее энергоэкономичного пути обхода сложных препятствий предложено рассматривать сетку глубин в виде ориентированного взвешенного графа. Определены условия соответствия кратчайшего пути на графе наиболее энергоэкономичному пути. Разработан алгоритм перебора вариантов пути обхода с отсечением, базирующийся на алгоритме «поиска на графе в глубину». На примере обхода сложного препятствия показано преимущество использования предложенного метода выбора варианта обхода препятствия по сравнению с традиционно предлагаемыми обходами сверху или сбоку препятствия. Приведен пример использования разработанного метода для определения наиболее энергоэкономичного пространственного пути обхода сложного препятствия. Результаты проведенных численных экспериментов подтвердили правильность предложенного решения: сокращение пути для рассмотренного варианта препятствия составило 15–20%, что позволяет реализовать предложенный метод выбора энергоэкономичного пространственного пути обхода сложного препятствия в системе управления автономного необитаемого подводного аппарата.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, рельеф дна, батиметрическая карта, алгоритм Кригинга, поиск кратчайшего пути на графе, энергоэкономичный путь.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00803, <https://rscf.ru/project/23-29-00803/>.

² Любовь Александровна Мартынова, д.т.н., в.н.с. (martynowa999@bk).

³ Алексей Александрович Павлов, к.т.н., ведущий инженер-программист (ialex.science@gmail.com).

1. Введение

В настоящее время совершенствование технологий привело к возможности создания АНПА для решения широкого круга задач подводного наблюдения [5] при выполнении протяженного маршрутного задания (МЗ) в течение длительного времени. АНПА дальнего плавания в ходе выполнения МЗ способен преодолевать значительные расстояния – свыше 10 тыс. км в течение нескольких месяцев.

Несмотря на прокладку маршрута в обход областей навигационных опасностей, по ряду причин на пути следования АНПА возможно возникновение препятствий:

- не всегда при прокладке маршрута существует возможность обхода зон навигационной опасности;
- из-за нарастания с течением времени погрешности навигационных определений АНПА возможно его отклонение от МЗ;
- прогноз условий внешней среды на длительный период невозможен, а их влияние может привести к отклонению АНПА от МЗ;
- из-за наличия неучтенных препятствий, связанных с неточностями существующих навигационных карт.

Таким образом, необходимо допускать возможность попадания АНПА в зону с препятствиями, что определяет актуальность проводимых исследований.

Получение первичной информации о возникновении препятствия по курсу движения АНПА происходит по данным гидролокатора секторного обзора (ГСО), зондирующего пространство перед АНПА. Регистрация приемником ГСО отраженного сигнала означает, что впереди по курсу движения АНПА находится препятствие. Из-за ограничения по углу сектора обзора ГСО, а также из-за ограниченной дальности действия ГСО, система управления АНПА не способна сходу оценить размер и форму препятствия и определить энергоэкономичный путь его обхода. Под энергоэкономичным путем обхода препятствия будем понимать такой путь, при движении по которому происходит наименьший расход энергоресурса АНПА.

В имеющихся публикациях, посвященных обходу препятствия с использованием АНПА, рассматривается реакционный подход к выбору пути обхода, т.е. без учета формы всего препятствия: АНПА вынужден выбирать безопасное направление по текущим показаниям ГСО [4]. Так, в ряде источников [1, 3] предлагается обходить препятствие сверху, однако препятствие может возвышаться над морской поверхностью и попытка обойти его сверху становится бессмысленной, что приводит к неоправданному перерасходу энергоресурса. В случае невозможности обхода препятствия сверху в [2, 4] предлагается попытаться обойти его сбоку, наугад выбирая направление обхода слева или справа, определяясь в процессе обхода с глубиной движения [2].

Публикации по обходу препятствия АНПА связаны с определением пути по текущим измерениям отраженного от препятствия сигнала и детально описаны в [9, 16, 17, 21, 22, 24]. Так, в [17] представлена разработка алгоритма обхода препятствий для АНПА на основе нечеткой реактивной архитектуры для различных скоростей движения аппарата. В [21] основное внимание уделено онлайн-планированию обхода препятствий. Для улучшения автономной способности и интеллекта при планировании обхода препятствий предлагается рекуррентная нейронная сеть со сверткой. В [24] предложен алгоритм обхода препятствий по трехмерной траектории. В [16] предложен подход к построению архитектуры системы управления АНПА для предотвращения столкновений и движения АНПА в неструктурированных средах. Подход сочетает в себе как реактивный, так и совещательный компоненты, а традиционная трехуровневая архитектура расширена за счет включения четвертого уровня сценария. В [22] 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. Полученные решения объединяются с помощью весового нечеткого логического контроллера для генерации окончательной команды движения. В [13] для колесного робота пред-

ложен выбор кратчайшего пути достижения целевой точки в условиях препятствий на основе нейронных сетей.

Таким образом, применительно к подводной среде имеющиеся публикации посвящены обходу препятствий мезорельефа и микрорельефа. Однако при выполнении протяженного МЗ исчисление ведется сотнями километров, и в этом случае используется информация макрорельефа.

Для того чтобы АНПА смог сформировать обход препятствия по наиболее энергоэкономичному пути, ему необходимо:

- идентифицировать препятствие по той информации, которая имеется у него в базе данных; в базу данных могут быть загружены батиметрические данные тех участков дна [25], через которые проложено МЗ;
- оценить свое местоположение относительно препятствия;
- получить максимально возможную информацию о размере и форме препятствия.

Для безопасности АНПА целесообразно перед попаданием в зону с препятствиями запланировать обсервацию по сигналам спутниковых навигационных систем.

При наличии у АНПА информации о своем местоположении и батиметрических данных карты макрорельефа дна и физической карты морской поверхности АНПА способен идентифицировать препятствие и оценить свое местоположение относительно него. Этой информации достаточно для выбора макро-направления обхода препятствия. Так при выходе препятствия на морскую поверхность бессмысленно пытаться обойти его сверху, а при существенном превышении пути обхода препятствия слева выбрать путь обхода справа и наоборот.

В настоящее время благодаря развитию средств измерений глубин с привязкой результатов измерений к навигационным определениям и комплексной обработке результатов измерений можно использовать батиметрические карты, тем более что маршруты АНПА дальнего плавания прокладываются, как правило, по заранее обследованным акваториям.

Для того чтобы АНПА смог по данным батиметрической съемки сформировать энергоэкономичный путь, необходимо предварительно проанализировать возможность получения по

данным мезорельефа уточненные данные микрорельефа, загрузить массив узловых точек макрорельефа и мезорельефа в бортовой компьютер АНПА по всем препятствиям, которые потенциально могут встретиться на долгом пути АНПА с учетом отклонения АНПА от МЗ из-за накопления погрешности навигационных определений. Для применения в ходе определения энергоэкономичного пути алгоритма Кригинга [10, 11, 15] для измельчения сетки глубин необходимо соблюдать [20, 23] принцип несмещенности среднего: взятые все вместе значения на карте должны иметь правильное среднее значение. Глобальная несмещенность формально обеспечивается за счет повышения низких значений и уменьшения высоких. Тогда при правильных выбранных априорных предположениях алгоритм Кригинга дает наилучшее линейное несмещенное предсказание промежуточных значений. Для сокращения памяти бортового компьютера при загрузке батиметрической карты с измельченной сеткой глубин можно использовать технологию запекания текстур [26], транспонирующую текстуру и детали с высокополигональной модели на низкополигональную. Это позволит перейти от 3D-модели рельефа к двумерной.

При наличии перечисленной выше информации и соблюдения ограничений система управления АНПА имеет все данные о форме препятствия, что позволяет обоснованно выбрать энергоэкономичный путь обхода обнаруженного препятствия.

В связи с отсутствием в публикациях описания выбора пространственного пути обхода препятствия морским робототехническим комплексом – АНПА – на основе информации о его форме целью работы явилось определение наиболее энергоэкономичного пути обхода препятствия.

2. Постановка задачи

Имеется АНПА, выполняющий протяженное МЗ. МЗ состоит из участков l_i , $i=1, \dots, M$; каждый из участков характеризуется координатами начала – конца и параметрами движения АНПА.

Пусть предварительно перед выполнением МЗ проведена съемка рельефа дна и по результатам съемки сформирована карта микрорельефа в виде сетки со значениями глубин h_i в узловых точках; значения узловых точек внесены в базу данных системы управления АНПА. Для сокращения объема вносимой в базу данных АНПА информации о препятствии проведено сжатие данных, в результате которого сформирована информация о мезорельефе дна в месте положения препятствия.

По каждому из режимов движения АНПА известны затраты энергоресурса; наименьшие затраты возникают при движении АНПА в режиме экономичного.

Предполагается, что перед входением АНПА в зоны с препятствиями проводится обсервация его местоположения по сигналам спутниковых навигационных систем.

Необходимо: сформировать энергоэкономичный путь обхода препятствия, т.е. определить координаты начала и конца участков пути обхода так, чтобы суммарный расход энергии по всем участкам пути обхода был минимальным на множестве альтернативных решений:

$$(1) \quad E = \sum_{i=1}^{M_r} e_i \rightarrow \min_{L_j}$$

где $i = 1, \dots, M_r$; M_r – количество участков пути обхода; L_j – множество альтернативных решений пути обхода; j – количество альтернативных вариантов путей обхода.

3. Предлагаемое решение

Для определения координат участков пути обхода необходимо сформировать путь обхода препятствия.

Для формирования энергоэкономичного пути необходимо использовать данные микрорельефа. Для этого предлагается алгоритмами системы управления АНПА измельчить грубую сетку батиметрических данных о препятствии из базы данных АНПА. Для измельчения сетки предлагается использовать алгоритм Кригинга. Это позволит по данным полученного микрорельефа сформировать множество путей обхода препятствия, из

которых затем выбрать наиболее энергоэкономичный путь, обеспечивающий минимальный расход энергии при обходе препятствия.

Алгоритм Кригинга основан на том, что расстояние или направление между узловыми точками отражает пространственная корреляция, которую используют для объяснения изменений рельефа дна. Для этого полагаем, что обеспечены наименьшая разница между фактическими и оцененными содержаниями (минимизация дисперсии погрешности) и отсутствие погрешности (несмещенность оценки).

Алгоритм Кригинга включает поисковый статистический анализ данных, моделирование вариограммы и создание поверхности морского дна. Для построения модели структуры измеряемых точек сформируем эмпирическую вариограмму, вычисленную для всех пар узловых точек, разделенных расстоянием h , с использованием уравнения

$$(2) \quad f(d_{ij}) = \frac{1}{2} \frac{(h_i - h_j)^2}{N},$$

где N – количество пар узловых точек; i и j – номера пар узловых точек; h_i, h_j – глубины в узловых точках; $f(d_{ij})$ – среднее значение глубины по результатам обработки пары точек i и j .

Пусть, например, рельеф дна имеет вид, представленный на рис. 1.

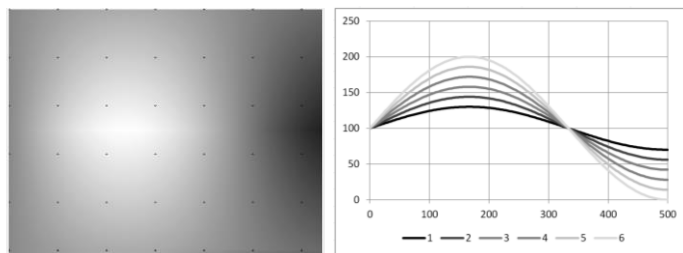


Рис. 1. Фрагмент рельефа морского дна и профиля глубин

На рис.1 слева оттенками серого цвета отражены глубины: с увеличением глубины цвет приобретает более темный оттенок. Черными точками показаны положения узлов батиметриче-

ской карты. Справа на рис.1 изображены профили глубины для вертикальных разрезов препятствия плоскостью. Из рис. 1 видно, что количество узловых точек, покрывающих препятствие, исчисляется единицами и не позволяет детально построить путь обхода данного препятствия. Для этого сформируем сетку с более крупным масштабом.

Вид вариограммы поверхности морского дна, изображенно-го на рис. 1, показан точками на рис. 2.

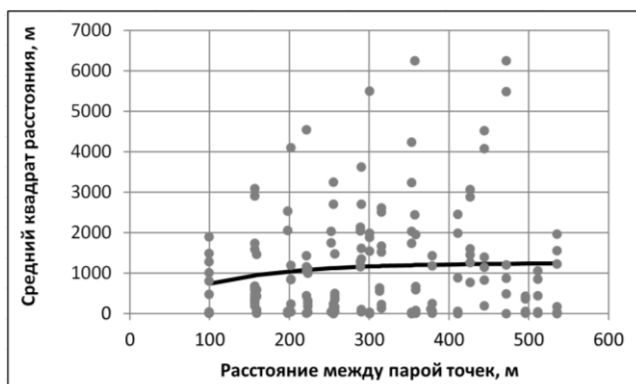


Рис. 2. Вид вариограммы в виде точек

Для прогнозирования глубин в узлах измельченной сетки морского дна сформируем математическую модель глубин в виде экспоненциальной функции вида

$$(3) \quad y(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-h}{c_2}\right) \right), & h > 0, \\ 0, & h = 0; \end{cases}$$

где c_0 , c_1 , c_2 – коэффициенты функции; h – глубина.

С использованием метода наименьших квадратов запишем уравнение

$$(4) \quad \Delta y = (y(h) - (c_0 + c_1(1 - \exp(-h/c_2))))^2 \rightarrow \min.$$

Найденные значения коэффициентов: $c_0 = 0$, $c_1 = 1250$, $c_2 = 110$; уравнение регрессии приняло вид:

$$y = 1250 \cdot (1 - \exp(-h/110)).$$

Зависимость, соответствующая этому уравнению, показана на рис. 2 сплошной линией.

Предсказание для неизмеренного местоположения глубины $Z(s_0)$ сформируем как взвешенную сумму данных:

$$(5) \quad \hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i),$$

где $Z(s_i)$ – измеряемое значение в местоположении i ; λ_i – неизвестный вес для измеряемого значения в местоположении i ; s_0 – местоположение прогноза, n – количество точек, используемых при определении глубины в произвольной точке.

Для расчета весов n узловых точек сформируем систему линейных уравнений:

$$(6) \quad \begin{bmatrix} y(x_{11}) & y(x_{12}) & \dots & y(x_{1n}) & 1 \\ y(x_{21}) & y(x_{22}) & \dots & y(x_{2n}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y(x_{n1}) & y(x_{n2}) & \dots & y(x_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(x_{10}) \\ y(x_{20}) \\ \dots \\ y(x_{n0}) \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $y(x_{11}), y(x_{12}), \dots, y(x_{nn})$ – значения вариограмм для рассчитанных расстояний между узловыми точками; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – весовые коэффициенты, которые необходимо найти; $y(x_{10}), y(x_{20}), \dots, y(x_{n0})$ – значения вариограмм для рассчитанных расстояний между узловыми точками и искомой точкой; μ – множитель Лагранжа.

В результате решения системы уравнений (5) определим весовые коэффициенты: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Подставляя весовые коэффициенты и значения узловых точек в выражение (4), определим глубину в искомой точке. По результатам обработки всех измеренных узловых точек получим значения глубин в промежуточных точках и тем самым уменьшим шаг сетки батиметрической карты.

Таким образом, применение алгоритма Кригинга позволило сформировать сетку глубин микрорельефа дна в районе выявления препятствия вперед смотрящим гидролокатором секторного обзора. Данные сетки глубин микрорельефа позволяют системе управления АНПА сформировать полную информацию о форме

препятствия и по алгоритмам системы управления АНПА [7, 8] выбрать наиболее энергоэкономичный путь обхода препятствия.

В данном методе обнаружение фрагмента препятствия ГСО можно считать получением первичной информации о том, что впереди по курсу движения есть препятствие. По этим данным с учетом информации о текущем положении АНПА появляется возможность идентификации своего взаимного положения относительно препятствия. Одновременно в системе управления АНПА с использованием алгоритма Кригинга происходит формирование модели рельефа всего препятствия. Сформированная таким образом вторичная информация берется за основу для определения энергоэкономичного пути обхода препятствия. И далее осуществляется движение АНПА по сформированному пути обхода препятствия. ГСО в этом случае играет вспомогательную роль, работая исключительно в целях безопасности, чтобы АНПА в процессе обхода не врезалось в выступ и т.п.

Для выбора энергоэкономичного пути проанализируем особенности траектории движения АНПА при переходе с одного участка пути обхода на другой и оценим возможность движения АНПА в энергоэкономичном режиме.

4. Определение энергоэкономичного пути

После получения более полной информации о геометрической форме и размерах препятствия с данными узловых точек осуществим выбор наиболее энергоэкономичного пути обхода препятствия.

Для определения пути обхода сложного препятствия измельченную сетку глубин представим в виде взвешенного ориентированного графа G , узлами Y_i которого являются узлы измельченной сетки батиметрической карты, а ребрами $S_{i,j}$ – пространственные расстояния между узлами. Каждый i -й узел характеризуется координатами (x_i, y_i) своего положения в горизонтальной плоскости и глубиной h_i в вертикальной плоскости.

Назначим ребрам веса, равные расстояниям между узлами трехмерной сетки (широта, долгота, глубина). Такой вариант позволяет формализовать задачу определения наиболее энерго-

экономичного пути обхода препятствия как двумерную задачу поиска кратчайшего пути в графе.

Путь L в графе \mathbf{G} – это последовательность узлов $L = (Y_1, \dots, Y_m, \dots, Y_M) \in Y$: Y_m смежен с Y_{m+1} для $1 \leq m \leq M$, M – количество узлов. Такой путь L является путем из узла Y_1 в Y_M , где Y_1 – положение АНПА в момент начала обхода препятствия, Y_M – целевая точка на маршрутной траектории после обхода препятствия.

Обозначим весовые функции $f_j: T \rightarrow R$, отображающие на ребра их веса, и весовые функции $f_m: Y \rightarrow R$, отображающие на узлы их веса. Весами являются затраты энергии. Задача сводится к определению в графе \mathbf{G} такого пути L^* движения АНПА в обход препятствия, который обеспечивал бы минимизацию затрат энергоресурса АНПА.

Остановимся подробнее на расчете затрат электроэнергии на каждом из участков пути.

Расход энергоресурса определяется скоростью движения и используемыми исполнительными механизмами: рулями, подруливающими устройствами, уравнильно-дифференциальной системой. Наиболее энергоэкономичным является движение АНПА в экономичном режиме с использованием рулей и без использования энергоемких подруливающих устройств и уравнильно-дифференциальной системы. Опишем путь АНПА моделью Номото [18]: каждый участок МЗ охарактеризуем расходом электроэнергии на установившееся движение и на движение в ходе переходного процесса при маневрировании по курсу, скорости и глубине:

$$(7) \quad E_r = E_{const} + E_{var},$$

где E_{const} и E_{var} – затраты энергии на устойчивое движение АНПА и на переходные процессы соответственно. Затраты энергии в ходе движения определим по результатам действия на АНПА гидродинамических сил, сил плавучести и сил, возникающих в результате работы исполнительных механизмов. Для этого представим динамическое состояние АНПА в процессе движения в морской среде в виде системы дифференциальных уравнений вида

$$(8) \quad \frac{dv_i}{dt}(M + M_{\text{пр}}) = \sum F_i,$$

$$(9) \quad \frac{d\omega_i}{dt}(J + J_{\text{пр}}) = \sum M_i,$$

где i – индикатор проекции на оси связанной с АНПА системы координат $Oxyz$, $i = x, y, z$; M – масса АНПА, кг; $M_{\text{пр}}$ – присоединенные массы воды, кг; $\sum F_i$ – суммы проекций всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат, Н; $\sum M_i$ – суммы проекций всех моментов инерции, действующих на объект, на оси связанной системы координат, Н·м; v_i – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат, м/с; ω_i – проекции вектора угловой скорости аппарата, с⁻¹.

По результатам решения системы уравнений (8)–(9) определяем длину пройденного пути.

Формирование взвешенного графа позволяет определить кратчайший путь в смысле минимизации энергозатрат в соответствии с (1).

Существует большое количество всевозможных алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе: алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана – Форда, алгоритм поиска A^* , алгоритм Флойда – Уоршелла, алгоритм Джонсона, алгоритм Ли (волновой алгоритм), алгоритм поиск кратчайшего пути на основе алгоритма Килдала. Однако практически все перечисленные алгоритмы являются эвристическими, в связи с чем для поиска кратчайшего пути предлагается использовать точные алгоритмы, а именно – путем перебора всех возможных вариантов пути от начальной точки Y_1 до конечной Y_M .

Для этого можно использовать, например, широко распространенные методы обхода графа: поиск в глубину (англ. Depth-first search, DFS) [12, 14, 19] или поиск в ширину (Breadth-first search).

Стратегия поиска в глубину (Iterative deepening) состоит в том, чтобы идти «вглубь» графа, насколько это возможно. Алгоритм поиска описывается рекурсивно: перебираем все исходящие из рассматриваемой вершины ребра. Если ребро ведет

в вершину, которая не была рассмотрена ранее, то запускаем алгоритм от этой нерассмотренной вершины, а после возвращаемся и продолжаем перебирать ребра. Возврат происходит в том случае, если в рассматриваемой вершине не осталось ребер, которые ведут в нерассмотренную вершину. Если после завершения алгоритма не все вершины были рассмотрены, то необходимо запустить алгоритм от одной из нерассмотренных вершин.

Стратегия поиска в ширину заключается в систематическом обходе всех ребер $G = (V, E)$ для «открытия» всех вершин, достижимых из S , вычисляя при этом расстояние (минимальное количество ребер) от S до каждой достижимой из S вершины.

В соответствии с поиском в глубину формируем пути с ребрами, альтернативными последнему l_n ребру. В соответствии с алгоритмом требуется просчитать все такие пути. Однако для сокращения вычислительных ресурсов и времени решения задачи выбора пути обхода препятствия усовершенствуем алгоритм поиска в глубину.

Для этого зададимся начальным значением длины пути, пройдя одну из веток графа от Y_1 до Y_M . Запомним это значение и значения ребер l_1, l_2, \dots, l_n , через которые проходит этот путь (через n вершин). Если из всех ребер последней глубины найдутся такие, вес которых превышает уже рассмотренное, то такие ребра отсекаем из дальнейшего рассмотрения.

Точно так же поступим на каждой из глубин по мере вычисления протяженности пути. В том случае, если текущее значение пути оказалось меньше посчитанного на предыдущих шагах алгоритма, этот путь берется за основу и поиск кратчайшего пути продолжается.

Кроме того, при оценке протяженности пути по мере движения АНПА от узла к узлу предлагается проводить постоянное сравнение вычисляемой в каждом узле протяженности текущего пути с протяженностью рассчитанных ранее путей. И если оказалось, что протяженность рассматриваемого пути превысила протяженность сформированного ранее пути, то рассмотрение текущего пути прекращается и происходит отсечение этого пути. Отсечение неперспективных вариантов позволяет эконо-

мить время и вычислительные ресурсы по сравнению с полным перебором всех вариантов путей обхода препятствий.

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

5. Результаты численных экспериментов

Оценим выигрыш предложенного решения по сравнению с приведенными в литературе рекомендациями обходить сбоку или сверху при условии, что сверху его можно обойти.

Оценим выигрыш на примере сложного препятствия, представляющего собой комбинацию двух фигур: в основании препятствия – пологая протяженная фигура, в верхней части препятствия – пикообразная фигура. Профиль препятствия представлен на рис. 3 слева. Он в основном совпадет с профилем пологого протяженного препятствия, представленного на рис. 1, с той лишь разницей, что в верхней части препятствия появился резкий вертикальный выступ: на рис. 3 справа пунктирной линией показан профиль пологого протяженного препятствия, сплошной линией – профиль комбинированного препятствия. Рассматриваемое препятствие можно трактовать как сложное, и очевидного ответа на вопрос о направлении его обхода – сверху или сбоку – в данном случае нет.

Рассмотрим три варианта обхода препятствия: первый – рекомендованный в литературе [2, 4] сверху, второй – сбоку, выбирая наугад направление, третий – комбинированный по предложенному в работе методу с использованием батиметрической и физической карт. В этом случае для построения сетки микро-рельефа используется грубая сетка мезорельефа и применяется алгоритм Кригинга. По результатам определения формы всего препятствия АНПА методом перебора с отсечением определяется энергоэкономичный пространственный путь обхода препятствия.

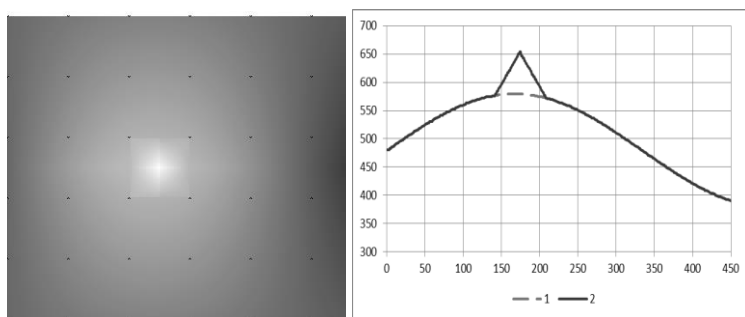


Рис.3. План и профиль рельефа комбинированного сложного препятствия

На рис. 4 приведен вид сверху на рассмотренные варианты обхода препятствия: сбоку без изменения глубины, сверху без отклонения от генерального направления МЗ и комбинированный вариант.

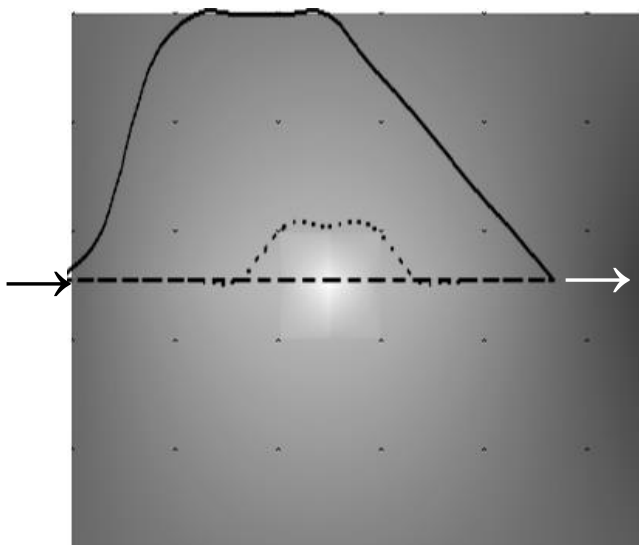


Рис.4. Вид сверху на траектории обхода препятствия: обход сбоку (сплошная линия), обход сверху (пунктирная линия) и обход комбинированным вариантом (точечная линия)

Таким оказался путь, сочетающий последовательность трех участков: первый связан с незначительным всплытием вверх, второй – с движением по окружности вокруг пикообразного выступа в верхней части препятствия и третий – заглублиение до первоначальной глубины движения АНПА.

По результатам моделирования [6] оказалось, что путь обхода сверху и путь обхода сбоку существенно энергозатратнее, чем путь, определенный с применением разработанного метода обхода: длина пути обхода препятствия сверху составила 523 м, обхода сбоку – 563 м, а при использовании предложенного метода – 447 м, что соответственно на 15% и 20 % короче традиционных вариантов обхода. Поскольку траектория движения не требовала поворотов на прямые и острые углы, то выбранный по методу путь может быть выполнен с экономичной скоростью, что означает, что этот путь оказался более энергоэкономичным.

Таким образом, пространственный обход комбинированного сложного препятствия привел к более энергоэкономичному пути по сравнению с обходом этого же препятствия сбоку или сверху, что подтверждает правильность предложенного решения.

6. Заключение

Для выбора пути обхода сложного препятствия разработан метод, основанный на данных батиметрических и физических карт Мирового океана. Определены условия применимости батиметрических и физических карт с мезорельефом для формирования пути обхода. Для перехода от мезорельефа к микрорельефу предложено использовать алгоритм Кригинга; на примере показана его работа. Для определения наиболее энергоэкономичного пути обхода сложных препятствий предложено рассматривать сетку глубин в виде ориентированного взвешенного графа. Определены условия соответствия кратчайшего пути на графе наиболее энергоемкому пути. Разработан алгоритм перебора вариантов пути обхода с отсечением, базирующийся на алгоритме «поиска на графе в глубину». На примере обхода

сложного препятствия показано преимущество использования предложенного метода выбора варианта обхода препятствия по сравнению с традиционно предлагаемыми обходами сверху или сбоку препятствия. Приведен пример использования разработанного метода для определения наиболее энергоэкономичного пространственного пути обхода сложного препятствия. Результаты проведенных численных экспериментов подтвердили правильность предложенного решения: сокращение пути для рассмотренного варианта препятствия составило 15–20%, что позволяет реализовать предложенный метод выбора энергоэкономичного пространственного пути обхода сложного препятствия в системе управления АНПА.

Литература

1. АГАРКОВ С.А., ПАШЕНЦЕВ С.В. *Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления* // Вестник МГТУ. – Т. 18. – №1. – 2015. – С. 7–11.
2. 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.
3. ЗАВЬЯЛОВ В.В., КЛЮЕВА С.Ф., ЛАБЮК Ф.И. *Анализ точности построения и использования цифровой модели дна в задачах навигации по полю глубин* // Transport Business in Russia. – №6. – 2015. – С. 211–213.
4. 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» (ТПМО-6). Владивосток. – 2015. – С. 450–454.
5. МАРТЫНОВА Л.А. *Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех* // Информационно-управляющие системы. – 2018. – №1(92). – С. 31–41.
6. МАРТЫНОВА Л.А., ГРИНЕНКОВ А.В., ПРОНИН А.О. и др. *Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата* // В сб.: «Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция

по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности». – 2017. – С. 474–479.

7. МАРТЫНОВА Л.А., КИСЕЛЕВ Н.К., МЫСЛИВЫЙ А.А. *Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата* // Информационно-управляющие системы. – 2020. – №4(107). – С. 31–41.
8. МАРТЫНОВА Л.А., МАШОШИН А.И., ПАШКЕВИЧ И.В. и др. *Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА* // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – №1(162). – С. 50–58.
9. ПШИХОПОВ В.Х. *Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями*. – М.: Физматлит, 2015. – 300 с.
10. ALCARAS E., PARENTE C., VALLARIO A. *From electronic navigational chart data to sea-bottom models: Kriging approaches for the Bay of Pozzuoli* // Acta IMEKO. – Vol. 10, No. 4, Article 9, December 2021, ID: IMEKO-ACTA-10 (2021)-04-09/.
11. AMOROSO P.P., FALCHI U., FIGLIOMENI F.G. et al. *The Influence of Interpolation Methods and point density on the Accuracy of a Bathymetric Model* // IEEE Int. Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea-2023), 04–06 October 2023. – DOI: 10.1109/MetroSea58055.2023.10317127.
12. BIRX A., DISSER Y., HOPP A.V. et al. *An improved lower bound for competitive graph exploration* // Theoretical Computer Science. – May 2021. – No. 868. – P. 65–86. – arXiv:2002.10958. – DOI: 10.1016/j.tcs.2021.04.003.
13. BRAHMI H., AMMAR B., ALIM I.A.M. *Intelligent path planning algorithm for autonomous robot based on recurrent neural networks* // Int. Conf. on Advanced Logistics and Transport, 2013. – P. 199–204. – DOI: 10.1109/ICAdLT.2013.6568459.
14. BRANDT S., FOERSTER K.-T., MAURER J. et al. *Online graph exploration on a restricted graph class: Optimal solutions for tadpole graphs* // Theoretical Computer Science. – November 2020. – No. 839. – P. 176–185. – arXiv:1903.00581. – DOI: 10.1016/j.tcs.2020.06.007.
15. CHANG J.-H., HART D.R., MUNROE D.M. et al. *Bias Correction of Ocean Bottom Temperature and Salinity Simulations From a Regional Circulation Model Using Regression Kriging* // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2021. – DOI: 10.1029/2020JC017140.

16. EVANS J., PATRÓN P., SMITH B. et al. *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.
17. GALARZA C., MASMITJA I., PRAT J. et al. *Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV* // *Appl. Sci*. – 2020. – Vol. 10. – P. 32–37.
18. GOKARN R.P. *A Study of Ship Manoeuvrability*. – Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2024. – P. 105–115.
19. IYANDA J.A. *Comparative Analysis of Breadth First Search (BFS) and Depth First Search (DFS) Algorithms*. – May 2023. Preprint. – URL: https://www.researchgate.net/publication/370751322_Title_A_Comparative_Analysis_of_Breadth_First_Search_BFS_and_Depth_First_Search_DFS_Algorithms (дата обращения: 17.06.2024).
20. LEE S.Y., MALLICK B. *Bayesian Hierarchical Modeling: Application Towards Production Results in the Eagle Ford Shale of South Texas* // *Sankhya B* 84. – 2022. – Vol. 84. – P. 1–43. – DOI: 10.1007/s13571-020-00245-8.
21. LIN C., WANG H., YUAN J. et al. *An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance* // *IIEEEJ. Ocean. Eng.* – 2019. – Vol. 44. – P. 120–133.
22. 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> (дата обращения: 17.06.2024).
23. RANFTL S., VON DER LINDEN W. *Bayesian Surrogate Analysis and Uncertainty Propagation*. // *Physical Sciences Forum*. – 2021. – No. 3(1):6. – arXiv:2101.04038. – DOI: 10.3390/psf2021003006. ISSN 2673-9984.
24. SAMI A., AYMAN M.M., BRISHA M. *Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance* // *Int. Journal of Computer Science and Network Security*. – 2012. – Vol. 12, No. 3. – P. 43–50.
25. *The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)*. – URL: <https://www.gebco.net/> (дата обращения: 17.06.2024).
26. VALENZA E. *Blender 2.6 Cycles: Materials and Textures Cookbook: Over 40 Recipes to Help You Create Stunning Materials and Textures Using the Cycles Rendering Engine With Blender*. – Birmingham, UK: Packt Pub Ltd, 2013. – 265 p.

METHOD CHOOSING AN ENERGY ECONOMICAL WAY TO BYPASS A COMPLEX OBSTACLE BY AUTONOMOUS

Lyubov Martynova, JSC Concern Central Research Institute Elektropribor, Saint Petersburg, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher (martynowa999@bk).

Alexey Pavlov, JSC Concern Central Research Institute Elektropribor, Saint Petersburg, Ph.D., Lead Software Engineer (ialex.science@gmail.com).

Abstract: A method based on bathymetric and physical maps of the World Ocean has been developed to select a bypass path around a complex obstacle. It has been proposed to use the Kriging algorithm to go from mesorelief to minirelief. It has been proposed to consider a depth grid in the form of an oriented weighted graph to determine the most energy-efficient bypass path around complex obstacles. The conditions for the shortest path on the graph to be the most energy efficient way have been determined. An algorithm for enumerating bypass path options with pruning has been developed, based on the "depth-first graph search" algorithm. The advantage of using the proposed method for selecting a bypass option over the traditionally proposed bypasses from above or from the side of the obstacle has been shown in an example of bypassing a complex obstacle. The results of the conducted numerical experiments confirmed the correctness of the proposed solution: the reduction of the path for the considered variant of the obstacle was 15-20%, which makes it possible to implement the proposed method of selecting an energy-efficient spatial path to bypass a complex obstacle in the control system of an autonomous underwater vehicle.

Keywords: autonomous underwater vehicle, bottom relief, bathymetric map, Kriging algorithm, search for the shortest path on a graph.

УДК 004.896

ББК 32.965.07

DOI: 10.25728/ubs.2024.111.11

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Алчиновым.*

Поступила в редакцию 19.05.2024.

Опубликована 30.09.2024.