

УДК 629.58 + 004.942

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА МОРСКОМ ДНЕ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

Л.А. Мартынова, И.С. Колесов (Санкт-Петербург)

Введение

Совершенствование технологий позволило создавать автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) для решения сложных задач [1-3], например, для поиска точечных антропогенных объектов на морском дне и в его толще. Для этого АНПА в подкильной области оборудуют разнородными средствами технического зрения (СТЗ), работающими на различных физических принципах: одно- или многолучевым эхолотом, гидролокатором бокового обзора, профилографом, видеокамерами и электромагнитным излучателем [4-8]. Эффективная работа этих средств возможна при нахождении АНПА на определенной глубине; при этом глубины эффективной работы СТЗ отличаются в зависимости от используемых СТЗ. В результате поиска антропогенных объектов алгоритмы системы управления АНПА [9-10] обрабатывают поступающую информацию, и по результатам обработки выявляют классификационные признаки искомого объекта. В случае выявления с высокой вероятностью классификационных признаков считается, что целеподобный объект (ЦО) обнаружен, после чего аппарат алгоритмами системы управления его классифицирует и определяет координаты его местоположения. На этапе первичного обнаружения используются СТЗ с высокой площадной производительностью. На этапе классификации обнаруженного ЦО происходит заглубливание АНПА с сопровождением обнаруженного ЦО для уточнения его классификационных признаков.

При ведении поисковых операций АНПА актуальной задачей является выбор поведения и параметров движения АНПА с позиции минимизации расхода энергоресурса.

При ведении поиска объекта энергия расходуется на: движение АНПА по поисковой траектории; работу СТЗ; маневрирование при уточнении классификационных признаков. Количество ЦО на морском дне существенно влияет на время и энергоресурс, затрачиваемые на классификацию ЦО, и не влияет на время движения АНПА по поисковой траектории. В связи с этим при большой плотности ЦО на морском дне может оказаться целесообразным переход от двухэтапного поиска и классификации – к одноэтапному с одновременным поиском и классификацией на более низкой глубине работы классифицирующих СТЗ. Для выбора алгоритма поведения аппарата в зависимости от условий внешней среды необходимо использование метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

В ходе применения метода статистических испытаний требуется моделирование различных вариантов поведения АНПА с учетом влияния на результат поиска условий внешней среды. Целью работы явилась разработка имитационной модели, поскольку аналитически описать процессы в ходе поиска антропогенных объектов невозможно, так как имеет место случайность положения объектов, плотность их распределения, влияние внешней среды и т.д. Необходимо разрешение противоречия: с одной стороны, АНПА оснащен широким спектром СТЗ, а с другой стороны, каждое из СТЗ требует определенных условий эксплуатации. Для применения метода статистических испытаний необходимо воспользоваться имитационным моделированием [11-15], направленным на определение средних временных и энергетических затрат при ведении

поисковых действий. В данном случае минимизация временных и энергетических затрат при вероятности обнаружении целеподобного объекта в пределах заданной области является критерием выбора поведения АНПА при поиске антропогенных объектов. Таким образом, задача состоит в определении наилучшей тактики ведения поиска (одноэтапный – двухэтапный) в различных условиях внешней среды.

1. Постановка задачи

Пусть имеется район протяженностью L и шириной B , имеются N ЦО, часть из которых являются искомыми объектами, а часть – ложными. АНПА оборудован в подкильной области разнородными СТЗ; часть этих средств имеет широкий сектор обзора и большую дальность, но слабую точность. Другая часть представляет собой более точные СТЗ с существенно меньшим сектором обзора. По результатам выявления классификационных признаков системой управления АНПА принимается решение относительно истинности обнаруженного ЦО.

Необходимо для формирования оператором маршрутного задания АНПА и реализации среды поддержки принятия решения определить:

- траекторию движения АНПА;
- глубину и скорость движения в зависимости от сложившейся обстановки;
- условия и последовательность включения средств обнаружения с позиции минимизации расхода энергоресурса.

2. Средства обнаружения и особенности их применения

Сложность решения задачи заключается в том, что заранее неизвестно положение и количество искомых объектов.

В связи с этим для обследования района АПНА может иметь на борту следующие средства обнаружения:

- МЛЭ (многолучевой эхолот) – гидроакустическое средство обнаружения для выявления неровностей дна и точечного объекта, зона обзора ориентирована вертикально вниз под килем в виде сектора обзора, угол полураствора сектора обзора α ; обнаружение объекта возможно с высоты над дном H_M м с вероятностью выявления классификационных признаков: по рельефу $P_0(At_1)$, по форме $P_0(At_2)$ и по размеру $P_0(At_3)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса;

- ГБО (гидролокатор бокового обзора) – гидроакустическое средство обнаружения для выявления неровностей дна и точечного объекта; зоны обзора ориентированы по бокам вниз в виде секторов обзора– с мертвой зоной под килем АНПА, угол полураствора сектора обзора α ; обнаружение целеподобного объекта возможно с высоты над дном H_G м с вероятностью выявления классификационных признаков: по рельефу $P_0(At_1)$, по форме $P_0(At_2)$ и по размеру $P_0(At_3)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса;

- ПФ (профилограф) – однолучевое средство обнаружения для обнаружения аномалий в толще дна, вскрытия слоистости дна по сонограмме, основанное на приеме излученного им низкочастотного сигнала, зона обзора ориентирована вертикально вниз под килем, зона обзора в виде узкого луча с углом полураствора в пределах 5° , дальность обнаружения целеподобного объекта H_{Π} м с вероятностью выявления классификационных признаков по неоднородности в морском дне $P_0(At_4)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса;

- телевизионная камера (поворотная черно-белая) – средство обнаружения для выявления формы обнаруженного объекта, дальность обнаружения $H_{ТЧБ}$ м, зона обзора в виде сектора обзора с углом полураствора α , который может быть развернут в произвольном направлении, с вероятностью выявления классификационных признаков: по форме $P_0(At_2)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса;

– телевизионная камера (поворотная цветная.) – средство обнаружения для выявления цвета и формы обнаруженного объекта, дальность обнаружения 10 м, зона обзора в виде сектора обзора с углом полураствора α , дальность обнаружения $H_{ТЦ}$ м, который может быть развернут в произвольном направлении, с вероятностью выявления классификационных признаков: по форме $P_0(At_2)$ и по цвету $P_0(At_5)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса;

– ЭМИ (электромагнитный излучатель) – средство обнаружения для выявления железосодержащих объектов на морском дне, зона обзора в виде сектора обзора с углом полураствора $\pm 90^\circ$, ориентирована в сторону дна, дальность обнаружения $H_Э$ м, вероятность выявления классификационных признаков: по содержанию железа $P_0(At_6)$ в зависимости от дальности до объекта и, возможно, ракурса.

3. Структура имитационной модели

Имитационная модель включает в себя блоки:

- блок моделирования обнаружения средствами технического зрения целеподобного объекта и выявления классификационных признаков;
- блок функционирования системы управления в части принятия решения относительно обнаружения целеподобного объекта и дальнейшего поведения АНПА;
- блок оценки времени, затрачиваемого на обнаружение объекта;
- блок моделирования движения АНПА;
- блок энергозатрат при движении АНПА по поисковой траектории.

Ниже приведено подробное описание перечисленных блоков.

4. Имитационное моделирование обнаружения целеподобного объекта

Имитационное моделирование включает в себя два этапа:

- моделирование обнаружения целеподобного объекта;
- выявление классификационных признаков обнаруженного целеподобного объекта.

Этап 1. Алгоритм оценки попадания объекта в сектор обзора формализован задачей попадания объекта в конус, угол при вершине которого соответствует углам секторов обзора в вертикальной и горизонтальной плоскостях гидроакустической системы АНПА, а высота – дальности обнаружения объекта.

Объект считается обнаруженным гидроакустическим сигналом, если объект геометрически попадает в пределы конуса обзора.

Алгоритм определения сближения объекта в пределы конуса с углами альфа-бета и дальностью R следующий: После обнаружения происходит переход на сопровождение. Оно заключается в том, что:

- акустически определяется обнаружение ВПО на сопровождении. Обнаружение означает положение ВПО в секторе;
- в случае обнаружения ВПО – оценивается расстояние от АНПА до ВПО, и если оно меньше заданного, то принимается решение о сближении с ВПО на дистанцию в пределах заданной.

Этап 2. В процессе поиска целеподобного объекта система управления АНПА оценивает вероятность (достоверность) обнаружения целеподобного объекта с использованием СТЗ, обладающих наибольшей площадной производительностью, на основе выделения границ точечного объекта и детектированием точечного объекта на фоне дна. При дискретном задании зависимости вероятности обнаружения целеподобного объекта от дистанции D_0 – для получения значений вероятности на промежуточных значениях дистанции предлагается использовать интерполяцию заданной кривой кубическим сплайном.

По результатам определения вероятности выявления классификационных признаков производится анализ: если вероятность P^* превышает заданный порог $P_{\text{МЛЭ}}(D)$ или $P_{\text{ГБО}}(D)$, то есть выполняется условие:

$$P^*(At_1) > P_{\text{МЛЭ}}(D) \vee P^*(At_1) > P_{\text{ГБО}}(D),$$

то система управления АНПА принимает решение, что выявленный признак достаточен для классификации обнаруженной неровности как целеподобного объекта.

Альтернативным вариантом является выдача средством обнаружения на определенной дистанции до объекта готового решения об обнаружении целеподобного объекта по результатам собственной обработки информации, то есть вместо зависимости вероятности обнаружения от дистанции средство обнаружения выдает бинарную переменную, принимающую значения «есть обнаружение»/«нет обнаружения».

По результатам обнаружения в системе управления АНПА принимается решение о дообследовании целеподобного объекта.

По результатам выявления классификационных признаков At_i , $i=1, \dots, 6$ вероятность P^* обнаружения объекта поиска вычисляется с использованием выражения:

$$P^* = 1 - (1 - P_0(At_1)) \cdot (1 - P_0(At_2)) \cdot (1 - P_0(At_3)) \cdot (1 - P_0(At_4)) \cdot (1 - P_0(At_5)) \cdot (1 - P_0(At_6)) \quad (1)$$

Показателем наличия искомого объекта по данным системы обнаружения в момент времени t является значение вероятности P^* . Если полученное значение вероятности, посчитанное с использованием (1), больше заданного значения P_z , принимается решение от том, что объект обнаружен. В противном случае принимается, что классификационных признаков или вероятности их выявления оказалось недостаточно, и необходимо проводить допоиск обнаруженного целеподобного объекта. Для допоиска целеподобного объекта выбирается средство обнаружения, способное выявить дополнительные классификационные признаки. Если в результате допоиска выявлены дополнительные классификационные признаки – определены форма объекта и/или цвет, однако этих признаков или вероятности их выявления оказалось недостаточно, чтобы считать объект обнаруженным, то в этом случае для допоиска целеподобного объекта выбирается соответствующее средство обнаружения, «заточенное» на невыявленный или выявленный с низкой вероятностью классификационный признак. Для эффективного использования уточняющего средства обнаружения АНПА переходит на глубину эффективной его работы и зависит над обнаруженным ранее целеподобным объектом или двигается короткими, близко расположенными друг к другу галсами.

Если вероятность выявления классификационных признаков, рассчитанная с использованием (1), превысила заданную, то принимается решение о том, что АНПА обнаружил объект поиска. В противном случае принимается решение о том, что объект поиска не обнаружен, АНПА отключает дополнительные малопроизводительные средства обнаружения и включает первоначальные наиболее производительные средства обнаружения, всплывает на глубину эффективного поиска этими средствами и продолжает обследование района, двигаясь поступательно дальше по первоначально заданному маршруту.

Если в какой-то момент вероятность P^* выявления классификационных признаков оказалась достаточной для того, чтобы считать объект обнаруженным, происходит:

- определение координат обнаруженного объекта путем комплексирования координат, полученных задействованными средствами обнаружения;
- регистрируются координаты обнаруженного объекта и погрешность их определения;

– всплытие АНПА на поисковую глубину для дальнейшего обследования дна;
 – в случае обследования всей площади заданной акватории АНПА завершает обследование.

5. Блок моделирования движения АНПА

Моделирование движения АНПА осуществлялось с использованием выражений:

$$X_{Ai} = X_{Ai-1} + V_A \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_A) \cdot \cos(\psi_A)$$

$$Z_{Ai} = Z_{Ai-1} + V_A \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_A) \cdot \cos(\psi_A)$$

$$Y_{Ai} = Y_{Ai-1} + V_A \cdot \Delta t \cdot \sin(\psi_A)$$

где X_i, Y_i, Z_i – координаты положения АНПА в i -ый момент времени;

Q_A – курс АНПА;

ψ_A – дифферент АНПА;

V_A – скорость движения АНПА;

Δt – временной интервал, равный длительности такта имитации.

6. Оценка энергозатрат при движении АНПА по поисковой траектории

Затраты электроэнергии при движении АНПА по поисковой траектории зависят от скорости, направления и глубины движения АНПА. Скорость и глубина движения определяются расстоянием до дна для эффективной работы СТЗ. Направление движения АНПА определяется маршрутным заданием. Движение на этапе поиска осуществляется с использованием маршевого движителя. При маневрировании на разворотах поисковой траектории используются кормовые вертикальные рули. При переходе от этапа поиска к этапу классификации с использованием более точных СТЗ требуется маневрирование АНПА для занятия более низкого эшелона по глубине, наиболее подходящего для эффективной работы более точных СТЗ. При маневрировании по глубине используются либо энергоемкие подруливающие устройства (ПУ) для вертикального погружения АНПА, либо без использования ПУ осуществляется движение по глиссаде или спирали. Маневрирование по курсу и глубине осуществляется с использованием кормовых рулей – менее энергоемких по сравнению с ПУ.

При потере контакта с искомым объектом АНПА переходит на вторичный поиск, для чего совершает круговые движения с включенными точными СТЗ, и при отсутствии обнаружения искомого ЦО – занимает место и глубину последнего контакта с ЦО.

Затраты энергии на этапе поиска и этапе классификации:

$$Q = q_n + q_k,$$

где q_n – затраты энергии на движение АНПА по поисковой траектории; q_k – затраты энергии на выявление дополнительных классификационных признаков ЦО.

Зависимость затрат энергоресурса от плотности ЦО на морском дне имеет вид:

$$Q = q_n + N \cdot R \cdot q_k; \quad (2)$$

где N – количество ЦО, определяется плотностью R ЦО на единицу площади дна заданного района: $N = n \cdot S$, где S – площадь заданного района, определяется как $S = L \cdot B$.

С увеличением количества ЦО на морском дне может оказаться целесообразным продолжать поиск ЦО на глубине этапа классификации без всплытия, включив, соответственно, СТЗ этапа поиска. При этом, однако, сократится ширина полосы обзора СТЗ, используемых на этапе поиска, что будет означать необходимость прохождения в процессе поиска большего количества галсов для обследования всей площади заданного района.

Для оценки влияния сокращения ширины полосы обзора на энергозатраты, раскроем параметр q_k энергозатрат на классификацию из выражения (2):

$$q_k = q_z + q_k + q_v + q_{вп},$$

где q_z – энергозатраты на заглубление;

q_k – энергозатраты на классификацию;

q_v – энергозатраты на всплытие;

$q_{вп}$ – энергозатраты на вторичный поиск ЦО в случае потери контакта с ним.

Время обследования зависит от пройденного пути в процессе обследования. При движении АНПА галсами пройденный путь зависит от ширины полосы обзора, которая определяется проекцией зоны обзора используемых СТЗ на поверхность дна. Количество галсов в поперечном направлении определяется выражением:

$$G=L/D,$$

где $D=2R_a \cdot \sin\alpha$,

R_a – дальность СТЗ;

α – полураствор сектора обзора СТЗ.

При движении АНПА вблизи дна ширина осматриваемой полосы уменьшается пропорционально величине изменения глубины. При сокращении ширины полосы в K раз пройденное расстояние по поисковой траектории увеличится в K раз. Проведем сравнение двух вариантов ведения поиска объектов на дне.

В первом варианте использования производительных СТЗ и движении на большом расстоянии от дна затраты электроэнергии:

$$Q_1 = S_{a1}/V \cdot q_{п} + N \cdot R \cdot q_k,$$

где S_{a1} – проходимый АНПА путь при движении по поисковой траектории;

V – скорость движения по поисковой траектории.

Путь S_{a1} определяется шириной заданного района и шириной полосы обзора:

$$S_{a1} = B \cdot G = B \cdot L/D.$$

Тогда

$$Q_1 = S_{a1}/V \cdot q_{п} + N \cdot q_k = B \cdot L/D/V \cdot q_{п} + N \cdot q_k \cdot R.$$

Во втором варианте движение АНПА происходит на глубине эффективной работы менее производительных СТЗ; при этом пусть сокращение ширины полосы обзора произойдет в K раз.

Затраты энергоресурса определяются выражением:

$$S_{a2} = K \cdot B \cdot L/(G/K) = K \cdot B \cdot L/G.$$

Тогда

$$Q_2 = S_{a2}/V \cdot q_{п} = B \cdot L/(D/K)/V \cdot q_{п} = K \cdot B \cdot L/D/V \cdot q_{п}.$$

Таким образом, поиск сразу на низкой глубине более целесообразен при выполнении следующего условия:

$$S_{a1}/V \cdot q_{п} + N \cdot R \cdot q_k < S_{a2}/V \cdot q_{п},$$

откуда условие по количеству объектов N для поиска на глубине классификации:

$$N > (S_{a2}/V \cdot q_{п} - S_{a1}/V \cdot q_{п})/ R \cdot q_k.$$

Если, например, удельный расход при классификации в k раз больше, чем при движении по поисковой траектории, то есть

$$q_k = k \cdot q_{п},$$

то имеем:

$$N > (S_{a2}/V \cdot q_{п} - S_{a1}/V \cdot q_{п})/ R \cdot k \cdot q_{п}.$$

7. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)

Для определения вероятности обнаружения точечного объекта необходимо провести серию испытаний, в каждой серии провести, например, 1000 испытаний.

При проведении серии испытаний задаемся тактическим эпизодом с указанием размера района, параметров точечного объекта, гидрологии, плотности целеподобных объектов в заданном районе, по точечному объекту – открытый или заиленный.

В каждом испытании разыгрывается положение целеподобных объектов и имитируется движение АНПА по заданной поисковой маршрутной траектории и процесс обследования дна. При получении сигнала с выявлением классификационных признаков АНПА осуществляет уточнение классификационных признаков. Если они не подтвердились, АНПА продолжает поисковые движения по району. Если подтвердились, то считается, что искомый точечный объект обнаружен.

Испытание считается результативным, если искомый точечный объект обнаружен. Объект может быть не обнаружен из-за нехватки энергоресурса для обследования площади данного района (в данном случае энергоресурс выступает ограничением). Испытание в этом случае считается нерезультативным.

Замечание: с учетом того, что время поиска зависит от частоты появления целеподобных объектов, которые требуют дообследования, при этом на дообследованные тратится меньше энергии, чем на движение по району, так как движение АНПА минимально, поэтому считать расход энергии пропорциональным времени некорректно.

Количество испытаний N , необходимое для обеспечения заданной точности по вероятности обнаружения, определяется по формуле:

$$N = t_{\alpha}^2 \frac{P_{об}(1 - P_{об})}{\varepsilon^2}$$

где t_{α} – коэффициент Стьюдента;

ε – допустимое значение относительной ошибки;

$P_{об}$ – искомая вероятность.

Вероятность обнаружения $P_{об}$ рассчитывается как отношение результативных испытаний к общему количеству испытаний, как это происходило при оценке эффективности подводного морского оружия с использованием имитационного моделирования [13]:

$$P_{об} = \frac{N_0}{N}$$

8. Моделирование поведения АНПА при поиске объекта

Описанный выше процесс поиска требует от АНПА временных затрат, которые могут быть ограничены заданным временем на обследование района и косвенно оказывать влияние на расход энергоресурса.

Время поиска объекта складывается из:

- времени до первичного обнаружения целеподобного объекта;
- времени заглубления;
- времени движения вокруг целеподобного объекта;
- времени зависания над целеподобным объектом;
- времени проведения вторичной обработки;
- времени всплытия АНПА на первоначальную глубину.

Время движения АНПА до первичного обнаружения определяется скоростью движения АНПА $V_{п}$ и пройденным путем $W_{п}$:

$$T_{п} = W_{п} / V_{п}$$

Время заглубления определяется изменением глубины ΔH и вертикальной скоростью $V_{в}$ заглубления АНПА:

$$T_{з} = \Delta H / V_{в}$$

Время движения АНПА вокруг целеподобного объекта определяется радиусом окружности R , по которой происходит заглубление АНПА, и линейной скоростью движения АНПА $V_{п}$:

$$T_k = 2\pi R / V_{п.}$$

Время на зависание АНПА над целеподобным объектом определяется временем, необходимым для набора достаточного количества измерений с помощью СТЗ, чтобы по ним с требуемой вероятностью выявить классификационные признаки локальной неоднородности в морском дне.

Время на проведение вторичной обработки $T_{во}$ для оценки координат объекта поиска, во время которого АНПА движется над целеподобным объектом, определяется необходимостью набора достаточного количества измерений для того, чтобы с требуемой вероятностью выявить форму, размеры, ориентацию и координаты целеподобного объекта.

Время на всплытие, также как и на заглубление, определяется изменением глубины ΔH и вертикальной скоростью V_v изменения глубины:

$$T_v = \Delta H / V_v.$$

Тогда время на обследование района до момента обнаружения объекта поиска определяется выражением:

$$T_{\Sigma} = M \cdot (T_{п} + T_{з} + T_k + T_{пф} + T_{во} + T_v),$$

где M – количество обнаруженных целеподобных объектов.

9. Результаты численных экспериментов

С использованием специально разработанной имитационной модели функционирования АНПА [11] проведена оценка влияния количества ЦО: на расход энергоресурса при проведении поиска и на выявление наиболее энергоэкономичного варианта поиска объектов. Принимались следующие исходные данные: $L=1000$ м, $B=500$ м; N варьировалось от 40 до 400, ширина полосы обзора производительных СТЗ $D = 200$ м; $V = 2$ м/с. В процессе эксперимента варьировались: коэффициент сокращения ширины полосы обзора из-за приближения СТЗ к обследуемой поверхности дна от 1 до 10; удельный расход электроэнергии в процессе классификации от 5 до 15 уд.ед. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

На рисунке 1 по горизонтальной оси отложены варианты удельного расхода энергоресурса на этапе классификации, по вертикальной – объем энергорасхода в условных единицах. Пунктирными линиями обозначены расходы энергоресурса при двухэтапном обследовании дна, сплошной линией – расход энергоресурса при одноэтапном движении АНПА вблизи дна.

При незначительном сокращении полосы обзора наименьший расход наблюдается при движении АНПА вблизи дна. При существенном сокращении полосы обзора энергорасход возрастает и превышает энергорасход двухэтапного варианта поиска и классификации.

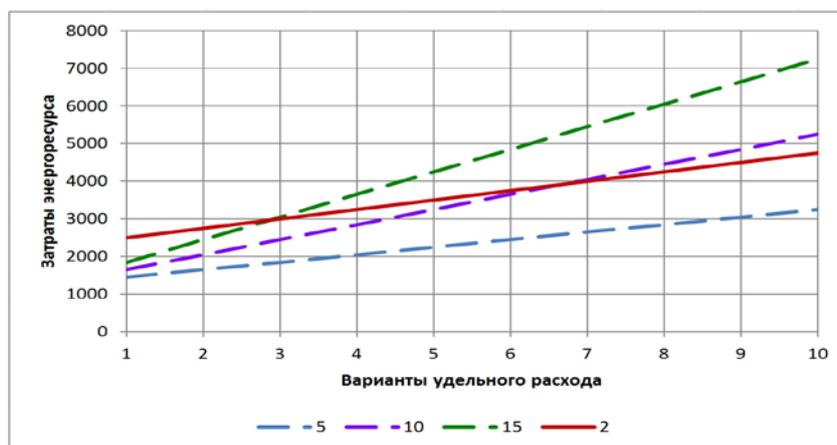


Рис. 1 – Расход энергоресурса в зависимости от параметров ведения поиска

Заключение

Рассмотрены варианты ведения поиска антропогенных объектов на разных глубинах движения АНПА. По результатам математического моделирования выявлено, что при незначительном сокращении полосы обзора из-за уменьшения расстояния до дна и высокой плотности ЦО на морском дне наиболее целесообразным является поиск вблизи дна. При существенном сокращении полосы обзора предпочтительнее ведения поиска в два этапа – этап обнаружения и этап классификации – на разных глубинах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803.

Литература

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение // А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. – Владивосток : Даль-наука. 2018. – 368 с.
2. **Боженев Ю.А.** Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Гидрофизика. 2011. Том 4. №11. С. 47–68.
3. **Павин А.М.** Разработка алгоритмов поиска и обследования искусственных протяженных объектов с помощью автономного необитаемого подводного аппарата. Дис. на соиск уч.ст. канд.тех.наук. Владивосток. 2010. – 160 с.
4. **Боровик А.И.** Технология использования АНПА для исследования подводных потенциально опасных объектов в Карском море / А.И. Боровик // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 1 (39). С. 32–41.
5. **Волощенко А.П.** Применение параметрического профилографа для исследования тонкой структуры морского дна// Научное приборостроение, 2021, том 31, № 1, с. 84–95.
6. **Лекомцев В.** Современные средства подводного звуковидения / В. Лекомцев, Д. Титаренко : Современные технологии автоматизации. 2011. № 3. С. 36-46.
7. **Inzartsev A.V.** AUV Application for Inspection of Partly Silted Underwater Cables / A.V. Inzartsev, A.M. Pavin, Yu.V. Matvienko // Sixth International Symposium on Underwater Technology, Wuxi, China, April 2009.
8. **Матвиенко Ю.В., Воронин В.А., Тарасов С.П., Скнар А.В., Тутынин Е.В.** Пути совершенствования гидроакустических технологий обследования морского дна с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2 (8). С. 4-15.
9. **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.
10. **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.
11. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474479.

12. **Моисеев Н.Н.** Алгоритмы развития / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука. 1987, – 304с.. 1978. – 400 с.
13. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М. РАН. 2018. 314 с.
14. **Davis P.K.** Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.