

УДК 004.94+629.58

ПЛАНИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОНИТОРИНГА В АКВАТОРИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

А.В. Инзарцев^{1,2}, А.В. Багницкий¹

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Дальневосточный федеральный университет²

Малогабаритные автономные подводные аппараты-роботы (АПР) используются для выполнения мониторинга водной среды и донной поверхности в акваториях различных типов. При выполнении таких работ необходимо решать взаимосвязанные задачи по предварительному планированию траектории движения АПР в двумерных районах произвольной формы, а также действиях робота при встрече с неучтенными препятствиями (естественного или искусственного происхождения). В последнем случае речь идет об организации обхода препятствия или перепланировании заданной траектории движения робота.

В сформулированных требованиях к алгоритму предварительного планирования траектории были учтены особенности работы бортового поискового оборудования, а также необходимость реализации алгоритма на судовом вычислительном комплексе и на борту АПР. С использованием этих требований проведен анализ ряда алгоритмов покрытия, применяемых как в наземной, так и в подводной робототехнике. В результате разработан квазиоптимальный алгоритм, который обладает низкой вычислительной ресурсоемкостью. Алгоритм может использоваться как при предварительном планировании траектории (в режиме off-line), так и для её перепланирования на борту АПР в реальном времени. Рассматриваются также алгоритмы автоматического обхода неучтенных препятствий на этапе реализации заданной траектории. Алгоритмы основаны на поведенческом и целеполагающих подходах. Обсуждаются как модельные результаты, так и результаты использования алгоритмов в реальных условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют задачи, связанные с использованием автономных подводных аппаратов-роботов (АПР) в ограниченных (как правило, мелководных) акваториях. К задачам такого рода можно отнести, например, экологический мониторинг и обзорно-поисковые работы в шельфовой зоне. При выполнении подобных работ АПР перемещается на небольшом отстоянии от грунта, а траектория движения аппарата представляет собой заранее спланированную композицию из одного или нескольких поисковых меандров [1, 2], вписанных в границы акватории. К особенностям работы АПР в этих условиях можно отнести наличие неучтенных

препятствий как естественного (береговая линия, отмели и т.п.), так и искусственного происхождения (затонувшие объекты), а также возможные ограничения на маневры в вертикальной плоскости, выполняемые для уклонения от столкновений с препятствиями. В последнем случае ограничения связаны с возможным выходом аппарата на поверхность. Типы обследуемых акваторий характеризуются глубиной места (мелководные, глубоководные), формой (односвязные простые и сложные, многосвязные), рельефом (естественный или с искусственными объектами), а также степенью детализации априорной информации об акватории (наличие карты).

В общем случае выполнение мониторинга с помощью АПР предполагает следующую последовательность операций:

- 1) предварительное планирование траектории покрытия (оптимальной в каком-то смысле), обеспечивающей гарантированный обзор каждого участка дна бортовыми поисковыми средствами;
- 2) выполнение запланированной траектории;
- 3) оценка обстановки в случае невозможности продолжения движения по траектории (обнаруже-

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
E-mail: inzartsev@yahoo.com, e-mail: bagn@marine.febras.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел.: 8(423) 221-55-45. E-mail: inzartsev@yahoo.com

ние незапланированного препятствия);

4) организация обхода препятствия (коррекция траектории) или перепланирование траектории при невозможности обхода (с последующим возвратом к п. 2).

Первая из этих операций выполняется на посту оператора АПР в режиме off-line, остальные три – на борту робота в реальном времени. В случае обследования акватории сложной формы планирование оптимальных траекторий представляет для оператора АПР достаточно трудоемкую задачу, решение которой желательно автоматизировать.

Заданная (спланированная) траектория (сеть галсов) далее реализуется информационно-управляющей системой (ИУС) робота. Для многих практических применений АПР пространственное перемещение робота разделяется на движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом горизонтальный канал осуществляет курсовую коррекцию движения к очередной цели и, может быть, маневрирование при обходе препятствий. Задача вертикального канала состоит в реализации эквидистантной траектории (по отношению к донной поверхности) и выполнении маневра по безопасному огибанию препятствий. Способы представления маршрутных заданий (миссий) многих обзорно-поисковых АПР ориентированы именно на подобное поведение робота. В контексте статьи под термином «обход препятствия» понимается маневр аппарата в горизонтальной плоскости, а «огибание» подразумевает вертикальный маневр.

Для обнаружения препятствий и определения дистанций до дна в переднем секторе обзора аппарата используется эхолокационная система (ЭЛС) с различным коли-

чеством дальномеров. На практике маневры АПР по избеганию столкновений с препятствиями часто ограничивают только вертикальной плоскостью, поскольку такой маневр:

- минимизирует отклонение траектории от заданной в горизонтальной плоскости;
- меньше искажает получаемые в процессе движения гидролокационные снимки;
- в подавляющем большинстве случаев эффективнее по времени и с максимальной вероятностью ведёт к успеху.

По этой причине количество дальномеров в ЭЛС ограничивается двумя-тремя, расположенными в вертикальной плоскости. Эта тенденция особенно заметна для малогабаритных аппаратов лёгкого класса. Например, хорошо известные АПР Gavia [3] или Alister-9 [4] оснащаются двумя дальномерами (эхолот и передний локатор). Горизонтальный маневр у этих роботов не предусмотрен – при невозможности обогнуть препятствие сверху миссия АПР прекращается. ЭЛС похожей конфигурации оснащён АПР МТ-2010 («Пилигрим») (рис. 1) [5]. Далее в статье предполагается, что АПР оснащён ЭЛС

с конфигурацией лучей, не позволяющей получить развернутую картину расположения препятствий впереди по ходу движения робота.

В то же время способность к горизонтальному маневру для АПР, оснащенного даже простой ЭЛС, может повысить вероятность выполнения миссии. Дело в том, что встречающиеся на мелководье препятствия техногенного происхождения относятся к объектам мезорельефа и характеризуются неестественными (непрогнозируемыми) формами, как, впрочем, и разного рода пики на склонах потухших подводных вулканов – гайотов [6]. Алгоритмы обхода препятствий, основанные на различных аппроксимациях макрорельефа по данным ЭЛС, рассчитаны на работу в естественной среде [7] и в этих условиях могут становиться неадекватными.

Таким образом, комплексная задача по построению оптимальной траектории покрытия и последующей её реализации с помощью АПР лёгкого класса, способных в то же время осуществлять обход и огибание донных препятствий, представляется весьма востребованной и актуальной. Далее

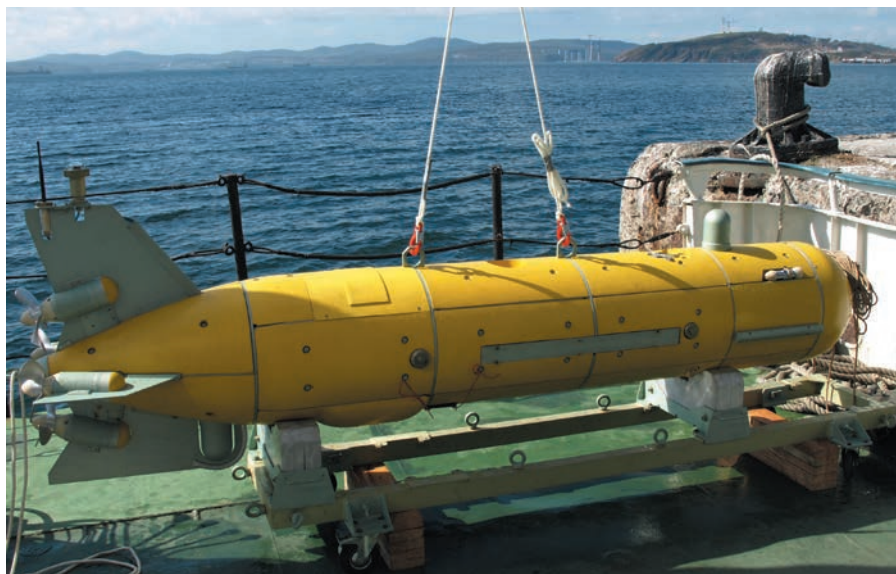


Рис. 1. АПР МТ-2010 «Пилигрим»

в статье обсуждаются алгоритмы, реализованные для этих целей в аппаратах ИПМТ ДВО РАН.

1. Планирование траектории

1.1. Формулировка задачи

Планирование траектории производится на посту оператора АПР и может выполняться как вручную (путём компоновки траектории из примитивов типа: прямоугольный меандр, спираль, циклоида) [1, 8], так и в автоматическом режиме [9, 10]. В последнем случае для этих целей используется специальный алгоритм планирования траектории покрытия (далее называемый «алгоритмом покрытия»).

Входными данными для алгоритма являются: исходная область покрытия и межгалсовая дистанция (рис. 2). На выходе формируется траектория движения АПР, решающая задачу покрытия. Это означает, что после прохода АПР по траектории все точки исходной области (или точки из заданного ограниченного набора) гарантированно попадут в зону действия бортовых поисковых устройств.

Исходная область покрытия является двумерным метрическим пространством и задаётся одним полигоном-границей с произвольным количеством полигонов-дыр. Полигон-граница содержит координаты внешнего контура покрываемой области и описывается как замкнутая кусочно-линейная кривая без самопересечений. Полигоны-дыры описываются аналогично и задают подмножества, исключаемые из множества, ограниченного полигоном-границей. Предполагается, что все полигоны не имеют пересечений друг с другом. Результирующее множество определяет как покрываемую область, так и разрешённую для навигации акваторию (выход АПР за её пределы запрещён).

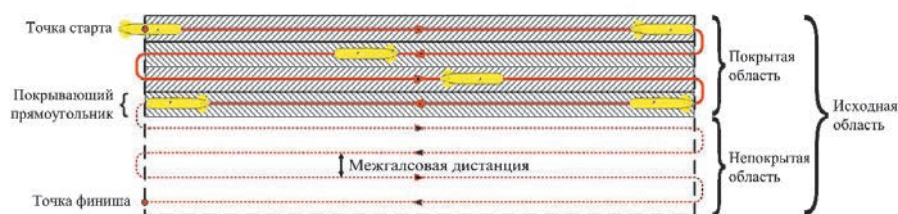


Рис. 2. Основные понятия в задаче покрытия области

Межгалсовая дистанция определяется оператором АПР исходя из дальности действия поисковых устройств на борту АПР и требований по пространственной плотности выполнения измерений. В данной статье в качестве бортовых поисковых устройств рассматриваются гидролокатор бокового обзора (ГБО) или многолучевой эхолот (МЛЭ), что во многом определяет приведенные ниже требования к разрабатываемому алгоритму.

1. Траектория покрытия должна состоять из минимального количества прямолинейных отрезков движения (галсов) и переходов между ними при соблюдении требования о заданной межгалсовой дистанции. Такая траектория уменьшает энергозатраты АПР и время, необходимое для покрытия. Также улучшаются условия работы бортовых акустических поисковых средств.

2. Прокладываемые галсы не должны выходить за пределы исходной области покрытия.

3. Область, которую АПР может покрыть, т.е. вычесть из непокрытой области, за один галс, является прямоугольником, который имеет длину, равную длине галса, и ширину, равную межгалсовой дистанции, т.е. галс является средней линией данного прямоугольника (рис. 2). Задача покрытия завершается в тот момент, когда непокрытая область полностью опустошается.

4. Допускается вычитание из непокрытой области участков, для обследования которых требуются галсы, покрывающие незначи-

тельную часть исходной площади. Данная величина может быть любой (например, менее 1% от исходной площади). Это допущение предотвращает нежелательное появление как коротких галсов, так и длинных, но с большой повторно покрываемой площадью.

5. В худшем случае алгоритм должен работать не медленнее, чем за полиномиальное время (зависящее от сложности границ района). Это требование продиктовано ограниченной производительностью компьютеров, используемых в ИУС АПР. Автоматическое перепланирование траектории может потребоваться на борту АПР в следующих случаях:

- при изменении границ заданного района обследования (например, во время проведения групповых операций АПР) или при поступлении новых данных об областях, запрещённых для навигации;
- при изменении параметров и условий работы исследовательского оборудования (например, в случае выхода его из строя).

1.2. Существующие алгоритмы покрытия

Алгоритмы покрытия разрабатываются с целью применения в самых разных областях: формирование траектории движения роботов-пылесосов, снегоуборщиков, техники для вспашки земли, уборки урожая, стрижки газонов, покраски и чистки объектов, а также для тушения пожаров и при поисковых операциях, выполняемых как в воздухе, на земле, воде, так

и под водой (пример: разминирование). Многие задачи имеют специфические особенности, что делает решение, пригодное для одной прикладной области, совершенно не подходящим для другой. Например, при вспашке земли большую роль играет рельеф, вынуждая двигаться по криволинейной траектории. Однако для подводной гидролокационной съёмки такое маневрирование не приемлемо.

Существующие алгоритмы (см. таблицу) представляют собой различные комбинации из решений трёх основных задач, которые лежат в основе задачи покрытия [10]:

1. Задача декомпозиции района (разбиение его на подрайоны, где направление галсов подчинено единому правилу). Решения:

- 1.1. клеточная декомпозиция;
- 1.2. разбиение на трапеции, объединяемые в полигоны;

1.3. разрезание по прямым линиям;

1.4. разрезание по кривым линиям;

1.5. разбиение на полигоны и поиск оптимальной комбинации их объединений.

2. Задача определения очередности покрытия подрайонов. Решения:

2.1. поиск в ширину;

2.2. обход вдоль минимального остоного дерева;

2.3. обход по правилу левой руки;

2.4. использование нейронных сетей;

2.5. муравьиный алгоритм;

2.6. обход графа Роба;

2.7. эвристическая функция;

2.8. произвольная очередность.

3. Задача выбора направления галсов (в пределах каждого подрайона). Решения:

3.1. набор определённых направлений (2, 4 или 8);

3.2. вдоль определённой кривой;

3.3. параллельно границам подрайона;

3.4. минимизация количества поворотов (вдоль наиболее длинной границы подрайона).

Разбиение района на клетки, расположенные в узлах регулярной решётки, является одним из первых алгоритмов декомпозиции. Каждая клетка маркируется либо как препятствие, либо как пространство. Путём соединения смежных клеток пространства строится граф переходов. Такой подход позволяет упростить геометрические вычисления, разбив операции с полигонами на множество элементарных подзадач. Клеточная декомпозиция лежит в основе многих алгоритмов покрытия: волнового [11], остовным деревом

Перечень существующих алгоритмов покрытия

Алгоритм покрытия	Декомпозиция района	Очередность подрайонов	Направления галсов
Волновой [11]	Клеточная	Поиск в ширину	8
Остовным деревом [12]	Клеточная	Обход вдоль минимального остоного дерева	4
Спиральный [13]	Клеточная	Обход по правилу левой руки	4
Нейросетевой [14]	Клеточная	Нейронная сеть	8
Муравьиный [15]	Клеточная	Муравьиный алгоритм	4
Генетический [16]	Разбиение на трапеции, затем на клетки	Обход графа Роба генетическим алгоритмом	8
Бустрофедон [17]	Разбиение на трапеции, объединяемые в полигоны	Обход графа Роба поиском в глубину	2
Разбиение и слияние [18]	Разбиение на трапеции, объединяемые в полигоны	Эвристическая функция	Минимизация количества поворотов
Распознавание топологии [19]	Разрезание по прямым линиям	Эвристическая функция	2
Трёхмерный [20]	Разрезание по кривым линиям, определяемым градиентом 3D координат	Произвольная	Вдоль «кривой посева»
Покрытие посредством функции Морса [21]	Разрезание по кривым линиям, заданным функциями Морса	Обход графа Роба поиском в глубину	Параллельно границам подрайона
Покрытие посредством диаграммы Вороного [21]	Разрезание по кривым линиям, образованным посредством диаграммы Вороного	Обход графа Роба поиском в глубину	Параллельно границам подрайона
Оптимальный [22]	Поиск оптимальной комбинации объединения полигонов, образованных на пересечении всех границ района, методом перебора	Произвольная	Минимизация количества поворотов

[12], спирального [13], нейросетевого [14], муравьиного [15] и генетического [16]. Достоинство клеточных алгоритмов – высокая производительность (вычисления, как правило, не превышают полиномиальное время), однако они не приспособлены к специфике подводной работы ГБО и МЛЭ, т.к. на выходе формируют «лестничную» траекторию, содержащую множество поворотов, если размер клетки достаточно велик. Если же размер клетки уменьшить, тогда результирующая траектория становится плавной кривой, что тоже неприемлемо.

Разбиение на трапеции, в отличие от клеточной декомпозиции, точнее описывает границы района и не вносит дискретность в траекторию. В целях оптимизации смежные трапеции, которые могут быть покрыты за один проход, объединяются в полигоны. Связность полученных подрайонов описывается графом Роба, обход которого позволяет получить результирующее покрытие. Алгоритм, действующий подобным образом, называется бустрофедон [17]. Он эффективен при покрытии районов вытянутой формы, когда известно его генеральное направление. Если же таких направлений несколько, выходная траектория содержит избыточное количество поворотов, т.к. во всех подрайонах галсы прокладываются в одном направлении. Частично этот недостаток был исправлен в алгоритме разбиения и слияния [18], где для каждого подрайона рассчитывается оптимальное направление галсов путём перебора. Это хотя и уменьшает вероятность неэффективного покрытия, но не исключает его полностью из-за ограничений на этапе декомпозиции. В противном случае алгоритм имел бы слишком низкую производительность.

Разрезание района по прямым линиям является быстрым способом декомпозиции, однако тоже накладывает ограничения на направление галсов и обладает теми же недостатками, что и разбиение на трапеции. Разрезание по прямым используется в алгоритме распознавания топологии [19], сильной стороной которого является то, что на входе ему не требуется карта, т.к. алгоритм рассчитан на её построение по данным от сенсоров в реальном времени.

Разрезание района по кривым линиям используется, когда требуется сложное движение и активное маневрирование объекта с учётом особенностей рельефа. Например, в работе [20] предлагается алгоритм криволинейного движения трактора с целью уменьшения вероятности эрозии почвы. В работе [21] рассматривается разрезание района по кривым линиям, заданным через различные функции Морса (в виде окружностей, квадратов и др.) и с использованием диаграмм Вороного. Однако к задаче, рассматриваемой в данной статье, эти способы декомпозиции неприменимы, т.к. не позволяют минимизировать количество поворотов АПР.

Представляет интерес алгоритм, описанный в [22], т.к. в декомпозиции используется поиск оптимальной комбинации объединения полигонов, образованных на пересечении всех границ района, методом перебора, что позволяет получать глобально-оптимальное решение задачи. Недостатком является экспоненциальная сложность вычислений, что недопустимо для выполнения на борту АПР.

Таким образом, ни один из существующих алгоритмов не удовлетворяет всей совокупности вышеперечисленных требований.

1.3. Предлагаемый алгоритм покрытия

Предлагаемый алгоритм покрытия разработан с учётом упомянутых требований и включает в себя три этапа. Первые два из них выполняются итерационно до тех пор, пока непокрытая область не станет пустой (см. рис. 3 и псевдокод в листинге 1). В самом начале непокрытая область принимается равной исходной. Ниже приводятся этапы работы алгоритма.

1. *Построение галсов.* Для каждого ребра (по всем полигонам из непокрытой области) строится максимально длинный галс (отрезок внутри области, координаты которого лежат на её границах), параллельный ребру и отстоящий от него на половину межгалсовой дистанции. Все построенные галсы заносятся в перечень (листинг 1, строки 3–17).

II. *Оптимизация.* Для каждого галса из перечня формируются покрывающий прямоугольник и рассчитывается значение оптимизирующей векторной функции (листинг 1, строки 18–25):

$$O_n = (S - S_n) \cdot \left(\frac{P}{P_n} \right), \quad (1)$$

где: O_n – значение оптимизирующей функции для n -го галса; S – площадь непокрытой области (м^2); S_n – площадь непокрытой области после вычитания прямоугольника n -го галса (м^2); P – периметр непокрытой области (м); P_n – периметр непокрытой области после вычитания прямоугольника n -го галса (м).

Среди полученных значений оптимизирующей функции (1) по всем галсам находится максимум. Галс с максимальным значением заносится в перечень оптимальных галсов и вычитается из непокрытой области (листинг 1, строки 26–33). Далее, если площадь непокрытой области больше нуля, происходит

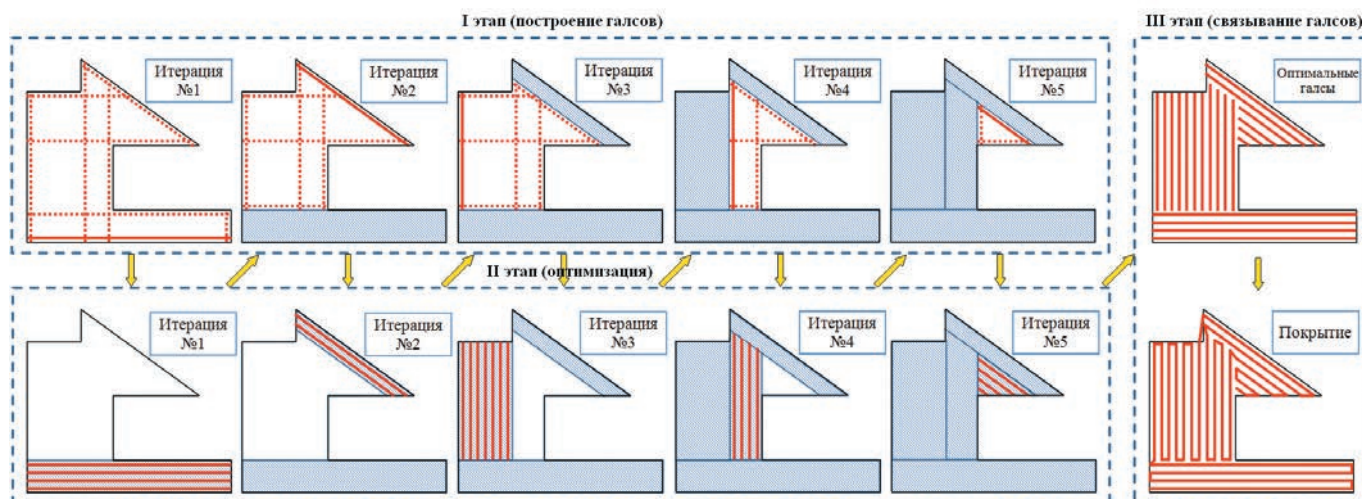


Рис. 3. Пример поэтапной работы предлагаемого алгоритма покрытия

Algorithm: Coverage Path Planning Algorithm**Input:** Region (set of polygon-borders and polygon-holes to cover),

Distance (between tacks of coverage path)

Output: Path (set of waypoints of coverage path)

```

1 OptimalTackSet ← {}
2 while GetArea(Region) > 0 do
3   TackSet ← {}
4   foreach Polygon1 in Region do
5     foreach Edge1 in Polygon1 do
6       Angle ← GetAngle(Edge1) - pi/2
7       Point ← GetShiftedPoint(GetVertex(Edge1),
                                GetShift(Angle, Distance/2))
8       Line ← GetStraightLine(Point, Angle)
9       CrossPointSet ← {}
10      foreach Polygon2 in Region do
11        foreach Edge2 in Polygon2 do
12          CrossPointSet ← GetCrossPoints(Line, Edge2)
13        end foreach
14      end foreach
15      TackSet ← GetSegmentsInsideRegion(CrossPointSet,
                                         Region)
16    end foreach
17  end foreach
18  VectorCriterion ← {}
19  foreach Tack in TackSet do
20    RemainRegion ← GetSubtraction(Region,
                                   GetCoverRectangle(Tack))
21    GreedCriterion ← GetArea(Region) - GetArea(RemainRegion)
22    RemoveMicroPolygons(RemainRegion)
23    EconomCriterion ← GetPerimeter(Region) /
                      GetPerimeter(RemainRegion)
24    VectorCriterion[Tack] ← GreedCriterion * EconomCriterion
25  end foreach
26  OptimalTack ← FindMaximum(VectorCriterion)
27  if OptimalTack ≠ {} then
28    Region ← GetSubtraction(Region,
                             GetCoverRectangle(OptimalTack))
29    RemoveMicroPolygons(Region)
30    OptimalTackSet ← OptimalTack
31  else
32    Region ← {}
33  end if
34 end while
35 Path ← LinkTacks(OptimalTackSet)
36 return Path

```

Листинг 1. Псевдокод предлагаемого алгоритма покрытия

возврат к этапу I. В противном случае либо при отсутствии галсов итерационный цикл завершается с переходом к этапу III.

III. *Связывание галсов*. Перечень оптимальных галсов соединяется в кратчайшую траекторию покрытия путём приблизительно-го решения задачи коммивояжера (листинг 1, строки 35–36).

Векторная функция (1) представляет собой мультипликативную свёртку двух критериев оптимальности: «жадности» и «бережливости».

«Жадность»: $(S - S_n)$ – это покрываемая галсом площадь. Критерий позволяет найти галс вдоль самого длинного ребра области и обладающий максимальным покрытием. Однако при использовании только этого критерия весь алгоритм становится жадным и генерирует неэффективную по времени траекторию. Причина заключается в том, что самые длинные галсы, как правило, резко сокращают площадь, покрываемую другими галсами, разделяя их пополам. Решение, выгодное на одной итерации, приводит к появлению невыгодных решений на следующих итерациях, для исправления чего введён критерий «бережливости».

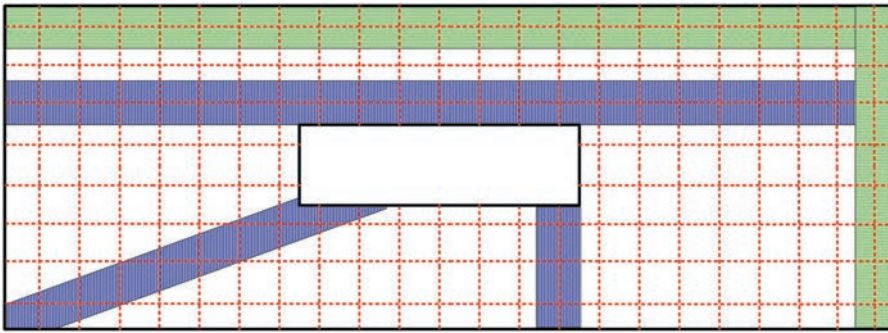


Рис. 4. Влияние «бережливых» областей покрытия (горизонтальный штрих) и «небережливых» (вертикальный штрих) на потенциальные галсы (пунктир)

«Бережливость»: $\left(\frac{P}{P_n}\right)$ – это величина, характеризующая уменьшение периметра непокрытой области после вычитания из неё очередного галса. Как видно из простых геометрических построений (рис. 4), покрывающие области, делящие пополам минимальное количество потенциальных галсов («бережливые»), всегда расположены вблизи рёбер полигона. При вычитании такой области из полигона его периметр изменяется в меньшую сторону, в этом случае критерий приобретает значение больше единицы. В то же время области, делящие пополам большое количество потенциальных галсов («небережливые»), расположены

ближе к середине полигона. При их вычитании периметр полигона изменяется в большую сторону, т.к. появляются длинные внутренние границы. В этом случае критерий приобретает значение меньше единицы. Это значение взвешивает решение, полученное первым критерием, и таким образом предотвращает наносимый «небережливыми» галсами «ущерб» для галсов последующих итераций. Отдельно от первого этот критерий не пригоден для оптимизации, т.к. генерирует неэффективную по времени траекторию.

Таким образом, мультипликативная свёртка «жадного» и «бережливого» критериев позволяет, на каждой итерации выбирая ком-

промиссное решение, получать эффективные траектории покрытия за полиномиальное время. Сложность предлагаемого алгоритма (без учёта сложности решения задачи коммивояжёра) асимптотически приближается к $O(N^2)$ в худшем случае, где N – суммарное количество рёбер в исходной области.

Пример работы алгоритма с использованием реальных данных показан на рис. 5. В центре изображенной на рисунке бухты Аякс (Японское море) находится небольшой остров. В 2008 году один из АПР разработки ИПМТ ДВО РАН выполнял в этой бухте мониторинг донной поверхности перед началом строительства объектов Дальневосточного федерального университета. При этом композиция заданных поисковых меандров планировалась оператором вручную в течение длительного времени. Генерация аналогичной траектории с применением предлагаемого алгоритма занимает около 50 мс реального времени.

2. Реализация и коррекция траектории

Реализация заданной траектории происходит на тактическом и исполнительном уровнях ИУС АПР [23]. При этом очередной элементарный фрагмент движения (галс) определяется на тактическом уровне и передается для последующей реализации в исполнительный уровень. В свою очередь, исполнительный уровень может вносить изменения в параметры выполнения галса при наличии помех движению (препятствий на пути следования). Для этого в его состав включен модуль коррекции целевых параметров движения. Основным поставщиком исходных данных для модуля коррекции выступает ЭЛС робота.

Задача управления движением АПР вблизи дна может быть све-



Рис. 5. Траектория покрытия бухты Аякс, сгенерированная алгоритмом

дена к задаче достижения целевой точки в неизвестной среде при соблюдении ряда ограничений. Здесь можно выделить два случая:

- движение в глубокой воде с неограниченными возможностями по маневрированию в вертикальной плоскости;
- движение АПР на мелководье либо среди локальных препятствий.

Первый случай достаточно подробно рассмотрен в работах [7, 24, 25]. Далее будет рассматриваться второй случай, который фактически представляет собой движение на плоскости. В этих условиях препятствия представляются в виде границ, образующих запрещенные зоны для движения.

Функционирование модуля коррекции может осуществляться как на базе реактивного (поведенческого) подхода, так и с применением планирования (целевого управления).

2.1. Обход препятствий на основе реактивного метода

Реактивное управление основано на текущих сенсорных данных и не предполагает долговременного планирования. Классически-

ми примерами такого управления является организация движения по эквидистанте, рассмотренная в упомянутых выше работах [24, 25].

К безусловным достоинствам подобных способов управления можно отнести адекватную реакцию робота в каждый момент времени на возможное изменение окружающей обстановки. Требования к навигационному обеспечению АПР для этого подхода минимальны и сводятся к наличию навигационно-пилотажных датчиков внутреннего контура управления. В горизонтальном канале управление может быть реализовано по аналогии с движением по эквидистанте в вертикальной плоскости. Что касается минимально необходимого количества лучей ЭЛС в горизонтальной плоскости, то здесь речь идёт, видимо, о трёх лучах (носовой и два боковых).

Основной проблемой является выбор канала управления для осуществления маневра при встрече с препятствием, поскольку при реактивном управлении мгновенной информации от ЭЛС недостаточно для принятия правильного решения. Выбор может быть осуществ-

лен путём оценки глубины места для совершения вертикального маневра и/или установки различных порогов показаний эхолотаторов для начала маневрирования в вертикальной или горизонтальной плоскости (т.е. приоритетности выбора).

Для организации маневрирования в модуле коррекции используется структура из двух поведений, объединенных в управляющую структуру с поглощением (рис. 6, а): движение в целевую точку ("Поведение 1") и отслеживание границ препятствия или протяженного объекта ("Поведение 2").

Для управления движением в поведении применяются ПИД-регуляторы, структура которых изложена в [25]. В качестве стабилизируемого параметра при движении вдоль препятствия в «Поведении 2» используется расстояние, измеренное по одному из боковых локаторов. В терминах упомянутой работы закон управления выглядит следующим образом:

$$M_y = K_1 \Delta x + K_2 \int_{t-\Delta t}^t \dot{\phi} dt + K_3 \dot{\phi}. \quad (2)$$

Здесь M_y – управляющий момент горизонтального канала,

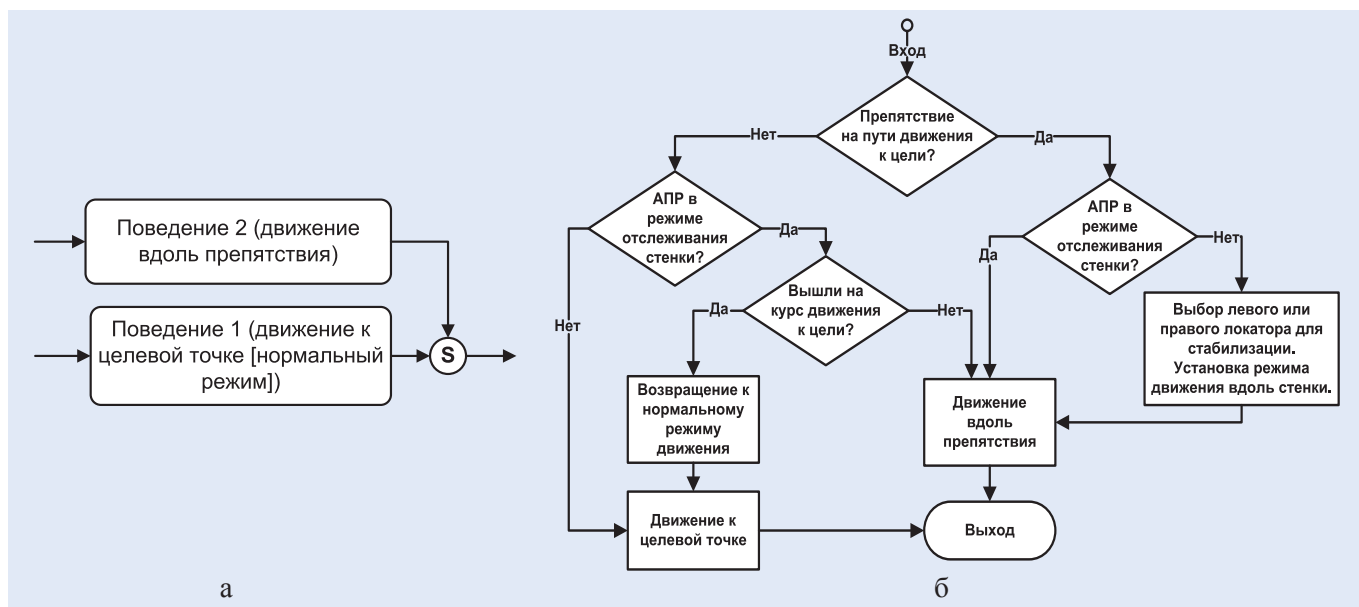


Рис. 6. Управляющая структура поведений (а) и их результирующий алгоритм работы (б)

$\dot{\varphi}$ – угловая скорость по курсу, Δx – ошибка стабилизации (разница между заданной безопасной дистанцией и измеренным расстоянием по одному из боковых локаторов), K_1 , K_2 , K_3 – коэффициенты при компонентах регулятора. Интеграл угловой скорости вычисляется на скользящем интервале Δt .

Результирующий алгоритм скоординированной работы поведения, ориентированный на циклическое выполнение, приведен на рис. 6, б и заключается в следующем:

- при отсутствии препятствий аппарат движется к целевой точке в обычном режиме;
- если дистанция до препятствия по переднему локатору меньше установленного порога, то аппарат переходит к режиму отслеживания со стабилизацией дистанции по одному из боковых локаторов, показывающему меньшую дистанцию;
- обход препятствия будет продолжаться до совпадения текущего курса АПР с заданным, при этом данные от переднего локатора должны подтвердить отсутствие препятствий впереди по ходу движения.

Показательный пример функционирования модуля коррекции на основе поведенческого подхода предоставляют глубоководные работы АПР ОКРО-6000 [26], проходившие в точке Мирового океана с координатами 8°36'N, 160°35'E. Местность в районе работ изобилует результатами вулканической деятельности. Для работы в таких условиях ЭЛС аппарата имеет левый и правый боковые дальнометры. АПР двигался вниз по склону гайота на небольшом отстоянии от грунта. На рис. 7, а представлен фрагмент изображения ГБО, полученный вдоль траектории движения. Видны многочисленные препятствия («пики»), мешающие

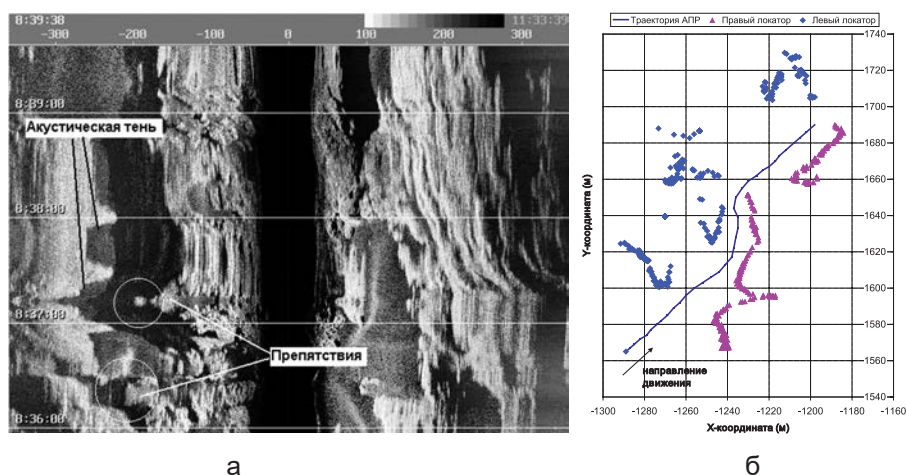


Рис. 7. ГБО-изображение участка траектории (а). По левому борту видны пики высотой около 12 м. Процесс обхода препятствия (б)

прямолинейному движению АПР. В таких условиях необходим маневр в горизонтальной плоскости. Во время движения АПР встретил крутое препятствие и произвел его обход ввиду нецелесообразности огибания. На рис. 7, б показаны соответствующий фрагмент траектории движения в горизонтальной плоскости, а также конфигурация препятствий, восстановленная по отсчетам ЭЛС.

2.2. Обход препятствий с осуществлением планирования

Целевое управление более характерно для наземных мобильных роботов, для которых задача прокладки трассы при неполной информации о местности заключается в достижении целевой точки при наличии препятствий лабиринтного типа. Движение планируется путем назначения подцелей, соответствующих видимым участкам рельефа. При этом на каждом шаге производится сканирование поверхности, разрешается противоречие между двумя управляющими факторами – продвижением к цели и обеспечением более благоприятных условий для обзора местности – и выполняется жесткое планирование участков трассы.

Для АПР обход или огибание препятствия на основе планирования предполагает построение его модели, для чего средствами ЭЛС осуществляется сканирование. Возможность осуществления сканирования связана с реализацией зависаний (hovering), что требует от движительно-рулевой системы наличия носовой и кормовых секций с маршевыми и подруливающими движителями. С другой стороны, эта же возможность позволяет сократить количество лучей ЭЛС в горизонтальной плоскости до одного (носового). Необходимость реализации намеченной траектории предъявляет дополнительные требования к навигационному обеспечению АПР. Бортовая навигационная система должна быть комплексированной и использовать данные доплеровского лага, а также инерциальной навигации (при наличии).

Алгоритм целевого управления проектировался таким образом, чтобы в максимальной степени использовать преимущества, предоставляемые ЭЛС различных конфигураций. Например, увеличение количества лучей ЭЛС ведёт к уменьшению секторов и времени сканирования для построения модели препятствий в том же объеме. Алгоритм построен из предполо-

жения о приоритетности огибания перед обходом. При движении АПР выполняется следующая укрупненная последовательность операций:

1) осуществляется движение к заданной точке (цель либо подцель при её наличии) с одновременным контролем наличия препятствия впереди по ходу движения. В критических ситуациях выполняется реверс до исчезновения угрозы столкновения;

2) при наличии устойчивого сигнала о препятствии по курсу следования оценивается возможность вертикального маневра, а также сектор горизонтального сканирования (исходя из конфигурации ЭЛС);

3) при недостаточной информации о размерах препятствия (например, при наличии только одного носового локатора), а также при возможности маневра в вертикальной плоскости (достаточная глубина) производится попытка огибания препятствия сверху;

4) если предыдущий пункт не выполнялся или закончился неудачей (огибание сверху невозможно), производится остановка и сканирование препятствия для определения возможности горизонтального маневра;

5) в процессе сканирования на плоскости строится буферная зона препятствий – объединение окружностей определённого радиуса, в центре которых располагаются найденные точки препятствий. По завершении сканирования выбирается подцель – промежуточная целевая точка, которая лежит вне буферной зоны, но в зоне действия ЭЛС и максимально близко расположена к цели (используются считанные координаты АПР). Предполагается, что при движении АПР из этой точки препятствие уже не будет являться помехой для достижения основной цели;

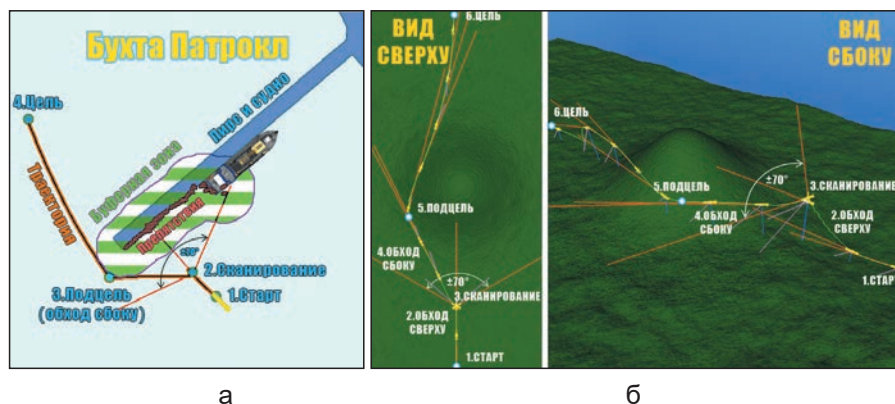


Рис. 8. Траектория АПР при обходе реального препятствия (по данным бортового накопителя информации и Google Maps) (а). Модельный пример обхода препятствия (б)

6) далее АПР перемещается к подцели, а последовательность шагов выполняется циклически, начиная с п. 1. Если в процессе движения к подцели обнаружится препятствие, то данная подцель аннулируется и процедура её поиска повторится.

В составе ИУС АПР алгоритм реализован на исполнительном и тактическом уровнях. Исполнительная часть алгоритма постоянно отслеживает навигационную обстановку и детектирует наличие препятствий. Агент тактического уровня при активизации обеспечивает сканирование, построение модели препятствия и последующий обход препятствия.

Для организации маневра в вертикальной плоскости используются режимы движения, рассмотренные в [25]. Проверка алгоритма выполнялась как на моделирующем комплексе [27, 28], так и в бухте Патрокл (Японское море) с использованием АПР типа «Пилигрим», имеющего ЭЛС с одним носовым лучом в горизонтальной плоскости. В качестве препятствия использовался пирс. Задание для АПР было составлено таким образом, чтобы целевая точка находилась по другую сторону пирса по отношению к точке старта. На рис. 8, а видно, что при встрече с препятствием АПР остановился и произвёл горизонтальное скани-

рование препятствия, поскольку огибание оказалось невозможным из-за небольшой глубины места. Процесс сканирования выполнялся в режиме позиционирования в точке с плавным изменением курса в секторе $\pm 70^\circ$ от направления на цель.

Далее была определена точка подцели в зоне действия ЭЛС, которая лежала вне буферной зоны препятствий и была максимально близка к цели. Переместившись в точку подцели, АПР смог затем беспрепятственно достичь основной цели. Испытания проводились несколько раз при различных начальных условиях. На рис. 8, б также приведён модельный пример обхода препятствия, включающий как огибание (на начальном этапе), так и обход препятствия (на заключительном этапе).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время намечился значительный прогресс в разработке различных гидроакустических средств получения информации об окружающей обстановке, пригодных к использованию на АПР. Примерами могут служить гидролокаторы переднего обзора. Однако несмотря на неоспоримые достоинства, заключающиеся в возможности получения подробной матрицы дальностей в перед-

ней полусфере робота, эти устройства могут быть установлены не на все типы АПР ввиду их массогабаритных характеристик и дороговизны. В связи с чем рассмотренные алгоритмы управления АПР среди локальных препятствий на базе недорогих и малогабаритных ЭЛС будут актуальны достаточно долго. Перспективы развития подобных алгоритмов видятся в их интеграции со SLAM-методами для более адекватной работы в локальной акватории или в среде препятствий со сложной конфигурацией.

Разработанный алгоритм планирования траектории покрытия находится на этапе внедрения в ИУС АПР. Существует несколько направлений развития алгоритма. Немалый интерес представляет формулировка задачи, рассматривающая по отдельности исходную область покрытия и область, разрешённую для навигации (в основном в ситуациях, когда покрытие выполняется последовательно в течение нескольких миссий АПР, либо при одновременной работе с несколькими АПР). Важной является и задача перепланирования покрытия «на лету» для нескольких АПР. Требуются дальнейшие исследования, направленные на повышение эффективности алгоритма (тестирование других вариантов свёртки вышеупомянутых критериев, использование эвристических методов, в частности, вращения системы координат для определения эффективного направления покрытия [18]).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-07-00350 (в части разработки алгоритмов покрытия акваторий и организации модельных экспериментов) и РНФ № 14-50-00034 (алгоритмы коррекции траектории вблизи объектов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного обитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 17–24.
2. Кузнецов О.Л., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Наумов Л.А. Опыт широкомасштабного поиска потенциально опасного подводного объекта в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 36–43.
3. Teledyne Gavia AUVs [Электронный ресурс] // Teledyne Technologies, Inc. URL: http://www.teledynegavia.com/product_dashboard/auvs (дата обращения: 12.09.2016).
4. ALISTER9. Man portable A.U.V. [Электронный ресурс] // Triton Imaging, Inc. URL: http://www.tritonimaginginc.com/site/content/hardware/ECA_ALISTER_9.pdf (дата обращения: 12.09.2016).
5. Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н. Малогабаритный многофункциональный автономный подводный аппарат «МТ-2010» // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12). С. 37–42.
6. Мельников М.Е., Плетнев С.П., Басов И.А., Седышева Т.Е. Новые данные о морфологии и геологическом строении гайота Грамберга (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 4. С. 105–115.
7. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПМО-6). Владивосток, 2015. С. 450–454.
8. Solar-powered Remote Monitoring System [Электронный ресурс] // Falmouth Scientific, Inc. URL: <http://www.falmouth.com/systems/solarremotemonitorsystem.html> (дата обращения: 12.09.2016).
9. Tufhanov I.E., Scherbatyuk A. Ph. A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015). Hamburg, Germany, 2015. P. 1679–1684.
10. Galaceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous systems. 2013. No. 61(12). P. 1258–1276.
11. Zelinsky A., Jarvis R.A., Byrne J.C., Yuta S. Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot // Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics. Tokyo, Japan, 1993. P. 533–538.
12. Gabriely Y., Rimon E. Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2001. No. 31(1–4). P. 77–98.
13. Lee T.-K., Baek S.-H., Choi Y.-H., Oh S.-Y. Smooth coverage path planning and control of mobile robots based on high-resolution grid map representation // Robotics and Autonomous Systems. 2011. No. 59(10). P. 801–812.
14. Luo C., Yang S. A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments // Neural Networks. IEEE Transactions. 2008. No. 19(7). P. 1279–1298.
15. Wagner I.A., Bruckstein A.M. Efficiently Searching a Graph by a Smell-Oriented Vertex Process // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 1998. Vol. 24, No. 1. P. 211–223.
16. Jimenez P.A., Shirinzadeh B., Nicholson A., Alici G. Optimal area covering using genetic algorithms // Proceedings of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced intelligent mechatronics. Zurich, Switzerland, 2007. P. 1–5.
17. Acar E.U., Choset H., Zhang Y., Schervish M. Path planning for robotic demining: Robust sensor-based coverage of unstructured environments and probabilistic methods // Int. Journ. of Robotics Research. 2003. No. 22(7–8). P. 441–466.
18. Oksanen T. and Visala A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines // Journ. of Field Robotics. 2009. No. 26(8). P. 651–668.
19. Yeun-Soo Jung, Kong-Woo Lee, Beom-Hee Lee. Advances in Sea Coverage Methods Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) // Recent Advances in Multi Robot Systems / ed. by Aleksandar Lazinica. Vienna: I-Tech Education and Publishing, 2008. P. 69–100.
20. Jin J., Tang L. Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming // Journ. of Field Robotics. 2011. No. 28(3). P. 424–440.
21. Acar E.U., Choset H., Rizzi A.A., Atkar P.N. and Hull D. Morse decompositions for coverage tasks // Int. Journ. of Robotics Research. 2002. No. 21(4). P. 331–344.
22. Huang W.H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms // Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Seoul, South Korea, 2001. P. 27–32.
23. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1(15). С. 4–16.
24. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.
25. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
26. OKPO 6000 platform [Электронный ресурс] // Autonomous Undersea Vehicle Applications Center. URL: <http://auvac.org/platforms/view/133> (дата обращения: 12.09.2016).
27. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE. Washington DC, USA, 2015. P. 1–8.
28. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M. A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV // Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE. Washington DC, USA, 2015. P. 1–7.