

УДК 551.46.077:629.584

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ МИССИИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ЗАДАЧАХ ОБСЛЕДОВАНИЯ АКВАТОРИЙ

А.В. Багницкий, А.В. Инзарцев

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН¹

Рассматриваются вопросы автоматизации процесса подготовки программы-задания (миссии) для АНПА, решающего обзорно-поисковые задачи. Предлагаемая система автоматизации включает в свой состав мастер подготовки запуска АНПА и симулятор миссий. Миссия компонуется из типовых элементов покрытия, при этом параметры каждого из них рассчитываются автоматически, исходя из задач запуска. Рассмотрены алгоритмы автоматизированного планирования траектории покрытия для акваторий произвольной формы. Результирующая траектория движения АНПА может быть далее детально просмотрена в двумерном или трехмерном представлении. Предлагаемый комплекс средств автоматизации освобождает оператора от выполнения рутинных операций и также может быть использован как тренажерное средство.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно наиболее распространенными классами задач, решаемых в настоящее время с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), являются обзорно-поисковые и инспекционные работы. Такие работы выполняются, как правило, путем площадной съемки выбранных участков донной поверхности (с использованием гидролокатора бокового обзора (ГБО), профилографа, фотосистем и другого оборудования) и последующего дообследования обнаруженных потенциально интересных объектов. Таким образом, типичная миссия АНПА по обследованию акватории состоит из фрагментов площадного и точечного обследований.

Перед запуском АНПА оператор должен подготовить программу-задание (называемую также миссией). Миссия вводится в систему программного управления (СПУ) АНПА

и представляет собой описание последовательности операций, которые необходимо выполнить для решения поставленных перед аппаратом задач [1]. Действия оператора можно классифицировать как планирование, эффективность которого может быть существенно повышена за счет использования более абстрактных, высокоуровневых команд (например, «Обследуй такой-то район», «Двигайся по путевым точкам»). Благодаря повышению уровня абстракции при планировании время, требуемое на подготовку миссии, может быть сокращено, а вероятность ошибки оператора – снижена. К тому же такой подход существенно снижает требования к уровню подготовки операторов и соответственно расширяет область использования АНПА.

Применительно к обзорно-поисковым задачам высокоуровневая команда «Обследуй район» должна автоматически генерировать сеть галсов, га-

рантированно покрывающих заданный участок акватории с учетом дальнего действия используемой бортовой регистрирующей аппаратуры. Могут быть использованы библиотеки команд, реализующие часто используемые маневры АНПА. В том или ином виде подобные функции встречаются в системах подготовки миссий различных АНПА [1, 3].

Рассмотрим программные средства поста оператора, разрабатываемые с целью автоматизации планирования обзорно-поисковых миссий и подготовки АНПА к запуску.

Назначение и состав средств автоматизации

В состав программного обеспечения поста оператора АНПА входят следующие программы.

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: (4232)432416. E-mail: imtp@marine.febras.ru



Рис. 1. Взаимодействие средств автоматизации поста оператора

1. Мастер запуска. Средство позволяет на основе визуального пользовательского интерфейса пошагово подготовить СПУ АНПА к запуску, начать и активно контролировать процесс выполнения программы-задания, а также скопировать данные из бортовых накопителей информации после подъёма аппарата. Мастер запуска позволяет оператору осуществлять те же действия для группы АНПА.

2. Симулятор миссий. Средство предназначено для отладки составляемой миссии и позволяет отображать траекторию, построенную по результатам постобработки навигационных данных АНПА, и виртуальную трёхмерную картину движения робота, полученную в результате моделирования. Также отображаются навигационные точки, графики, характеризующие изменение состояния аппарата, записи бортового журнала и другие данные. Движение ро-

бота моделируется с учётом его гидродинамических характеристик. Совокупность применяемых в симуляторе средств даёт возможность заниматься составлением и анализом программ-заданий даже в отсутствие АНПА (в режиме off-line). Симулятор создан на основе среды для моделирования и трёхмерного представления миссий [4] с развитием средств верификации программ-заданий [1].

Взаимодействие средств автоматизации показано на рис. 1. Пользователь при помощи мастера запуска выполняет следующие шаги:

- подготовку навигационной системы АНПА,
- загрузку шаблона или создание миссии при помощи графических инструментов в редакторе,
- проверку полученного задания посредством симулятора миссий,
- запуск и мониторинг процесса выполнения миссии,

- «выгрузку» полученных данных из АНПА.

В редакторе миссии формируется последовательность действий для каждого из задействованных в запуске АНПА (рис. 2).

Миссия строится с использованием загружаемой карты района посредством нанесения на неё графических объектов-примитивов (точка, линия, прямоугольник, полигон). Для каждого объекта указываются используемые бортовые устройства, автоматически или вручную подбираются параметры движения АНПА. Редактор миссий является дальнейшим развитием ранее разработанного в ИПМТ средства автоматизации планирования [5]. В предыдущей версии редактора миссия создавалась непосредственно из примитивов движения АНПА – галсов. В текущей версии добавлена такая категория, как «целевой район».

После задания пользователем районов поиска редактор автоматически формирует траекторию для обследования акваторий. Если район имеет непрямоугольную форму (и/или указаны запрещённые для плавания зоны), то в этом случае для спецификации параметров всех галсов миссии применяются так называемые алгоритмы покрытия (coverage algorithms), описанные ниже. Покрытие производится с использованием типовых элементов. Отредактированная и готовая миссия проверяется в симуляторе, затем при отсутствии замечаний загружается в СПУ АНПА.

В основе симулятора лежит клиент-серверная архитектура, которая была выбрана для осуществления поддержки многовариантных миссий. Код программы-задания компилируется вместе с кодом передатчика и в процессе своей ра-

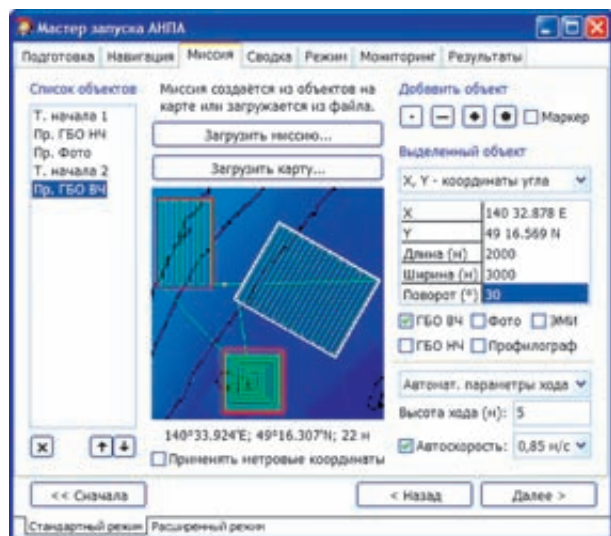


Рис. 2. Редактирование миссии АНПА



Рис. 3. Схема потоков данных в клиент-серверной архитектуре симулятора миссий

боты посылает данные серверу для обработки. Схема потоков данных в клиент-серверной архитектуре симулятора, поясняющая его принцип действия, изображена на рис. 3.

Используемые элементы покрытия для решения типовых задач

На этапе планирования траектории АНПА используются следующие типовые элементы покрытия районов: меандр, циклоида, спираль и зигзаг. Рассмотрим подробнее эти фигуры движения.

Меандр

Районы большой площади обследуются, как правило, при помощи ГБО. Движение АНПА в этом случае задаётся как последовательность параллель-

ных взаимобратных галсов, напоминающих прямоугольный меандр (рис. 4). Меандр обеспечивает наиболее эффективное покрытие больших территорий, поскольку не содержит повторных покрытий и возвратных движений [6].

Параметры меандра (соотношения длин сторон) выбираются с учётом параметров используемого ГБО. Расстояние между галсами может колебаться от 40 до 400 метров.

На рис. 4 изображены схема и основные параметры меандра:

A – длина рабочего галса (длина фигуры); B – длина промежуточного галса; C – ширина фигуры.

$$C = B \cdot (N - 1),$$

где N – количество рабочих галсов.

Длина пути:

$$L = (A + B) \cdot N - B = \frac{A \cdot C}{B} + A + C.$$

Площадь фигуры: $S = A \cdot C = A \cdot B \cdot (N - 1)$.

Меандр обладает одним из наиболее высоких соотношений покрытой площади к пройденному расстоянию $\frac{S}{L}$ из-за отсутствия избыточности.

При задании ориентации фигуры на местности учитываются 2 фактора: преобладающее направление течения и количество поворотов АНПА. Для минимизации количества поворотов рабочие галсы (в пределах которых происходит работа поисковых средств) ориентируются вдоль наиболее длинной стороны района. По возможности вся фигура разворачивается так, чтобы данные галсы были ориентированы вдоль течения. Вопросы минимизации влияния течений на движение АНПА рассмотрены ниже.

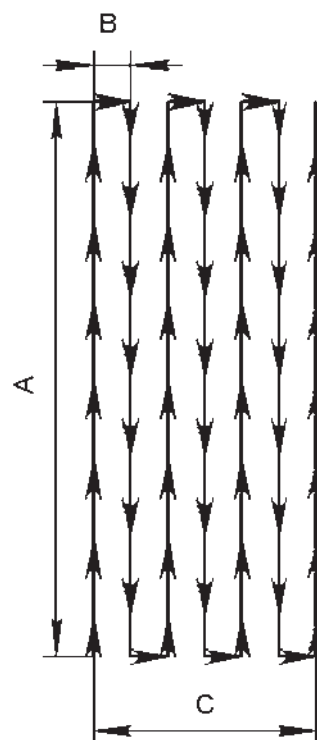


Рис. 4. Фигура типа меандр, используемая при площадной съёмке

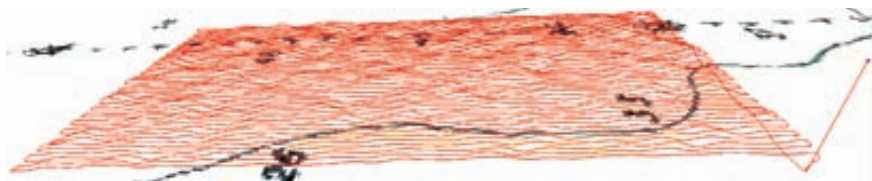


Рис. 5. Моделированная траектория движения АНПА меандром. Вид сбоку

Траектории на картографической подложке, изображённые на рис. 5-6, построены по данным бортовой навигационной системы (БНС) АНПА в результате рабочего запуска, а также по данным предстартовой проверки в симуляторе миссий.

Рассматриваемая миссия представляет собой меандр, состоящий из 48 рабочих галсов (с работающим ГБО) длиной 4 км, с шагом 40 м, при отстоянии от грунта 5 м на скорости 0,9 м/с.

Циклоида

Траектория движения в форме прямоугольной удлиненной циклоиды используется для досмотра точечных объектов (т.е. объектов, размеры которых сопоставимы с размерами АНПА и его радиусом циркуляции). Чаще всего координаты таких объектов выявляются в ходе площадных съёмок, поэтому наличие предварительной информации позволяет говорить

о досмотре, т.е. повторном и более детальном исследовании. Досмотр осуществляется, как правило, с использованием видеорегистраторов (фото или видеокамеры), поэтому высота движения АНПА над грунтом относительно небольшая (2-4 м). Типовая миссия заключается в параллельных галсах, расположенных друг от друга не далее, чем на 2-4 м для обеспечения перекрытия кадров. Параметры движения АНПА определяются требуемой степенью перекрытия снимков. Если в дальнейшем предполагается создание фотомозаики, то для корректной работы алгоритмов сшивки изображений требуется достаточно высокая степень наложения кадров [7].

К специфике обследования точечных объектов можно отнести то, что размеры объекта, дальность действия поискового устройства, погрешность координирования АНПА и его радиус разворота сопоставимы друг с другом. С учётом этого размеры

района поиска точечного объекта обычно задаются гораздо больше его реальных размеров. Характерным размером площади поиска для метрового объекта может считаться квадрат 80×80 м, который покрывается галсами с шагом 2 м.

На рис. 7 изображены схема и основные параметры циклоиды, которая показана для

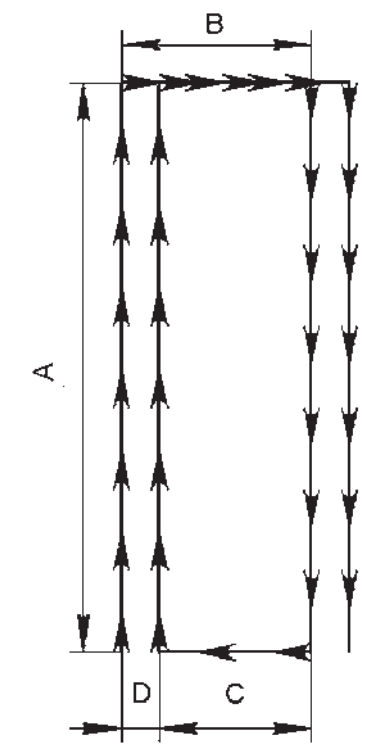


Рис. 7. Циклоида, применяемая для досмотра точечных объектов

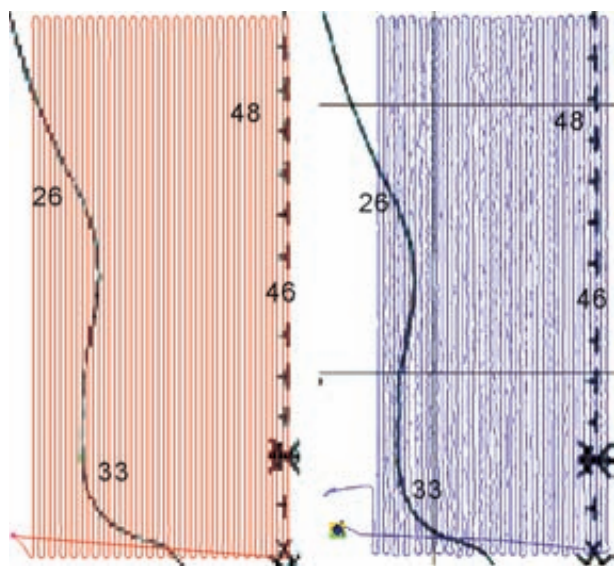


Рис. 6. Моделированная (слева) и реальная (справа) траектории движения АНПА меандром. Вид сверху

наглядности в незавершённом виде:

A – длина фигуры; B – длина галса вперёд; $2B$ – ширина фигуры; C – длина галса назад; D – шаг смещения. $C = B - D$.

Длина пути:

$$L = (2A + 2B - D) \cdot \left(\frac{B}{D} + 1\right).$$

Площадь фигуры: $S = A \cdot 2B$.

Траектория движения АНПА представляет собой смещающийся прямоугольник, при этом длина короткой стороны должна быть не меньше диаметра циркуляции АНПА.

Использование циклоиды позволяет аппарату смещаться на очень малые дистанции (1-4 м). Кроме того, повышается безопасность обследования, так как в циклоиде повороты выполняются аппаратом только у краёв фигуры. Поворот аппарата на ходу, как известно, сопровождается некоторыми изменениями скорости, дифферента и соответственно отстояния от дна. Минимизация поворотов в центре уменьшает угрозу столкновения, если известно, что именно там сосредоточена основная масса опасных для робота объектов.

Траектории, изображённые на рис. 8, построены в симуляторе миссий, а также по результатам постобработки навигационных данных, полученных в результате рабочих запусков АНПА. Фигура на рис. 8 представляет собой циклоиду размером 60×60 м с шагом 1 м (с работающей фотосистемой) и скоростью 0,8 м/с на высоте 2 м от дна.

Комбинация спирали и циклоиды

Для площадной фотосъёмки районов крупнее упомянутых выше 80×80 м применять циклоиду нецелесообразно ввиду её избыточности. Участок большего размера гораздо эффективнее покрывать сходящейся прямоугольной спиралью Архимеда (рис. 9). В тот момент, когда одна из длин галсов уменьшается до 80 м, следует переходить к циклоиде, поскольку на крейсерской скорости АНПА не сможет должным образом вписываться в повороты малой спирали. Спираль пригодна для обследования как точечных объектов, так и площадей, не уступая меандру в эффективности. Для спирали и циклоиды справедливы те же соображения по выбору ориентации, что и для меандра.

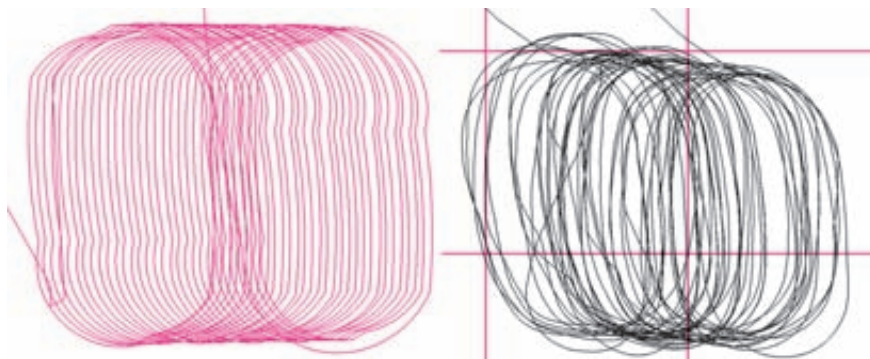


Рис. 8. Моделированная (слева) и реальная (справа) траектории движения АНПА циклоидой. Размер клетки 50×50 м

На рис. 9 изображены схема и основные параметры фигуры типа спираль:

A – начальная длина галса; B – начальная ширина галса; C – шаг изменения длины; D – шаг изменения ширины; E – конечная длина галса; F – конечная ширина галса; G – количество полувитков.

$$G = \min\left(\frac{A-E}{C}, \frac{B-F}{D}\right).$$

Длина пути:

$$L = \frac{G \cdot (2A + 2B) - G \cdot (G-1) \cdot (C + D)}{2}.$$

Площадь фигуры:

$$S = (A - C) \cdot B - E' \cdot (F' + D),$$

где

$$E' = A - G \cdot C, F' = B - G \cdot D.$$

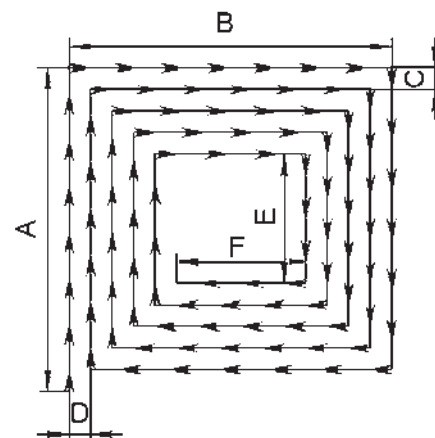


Рис. 9. Фигура типа спираль, используемая для досмотра и площадной съёмки

Траектории на рис.10 получены на основе модельных и реальных данных запуска АНПА.

Рассматриваемая миссия состоит из двух фигур (с включённой фотосистемой, электромагнитным искателем (ЭМИ) и

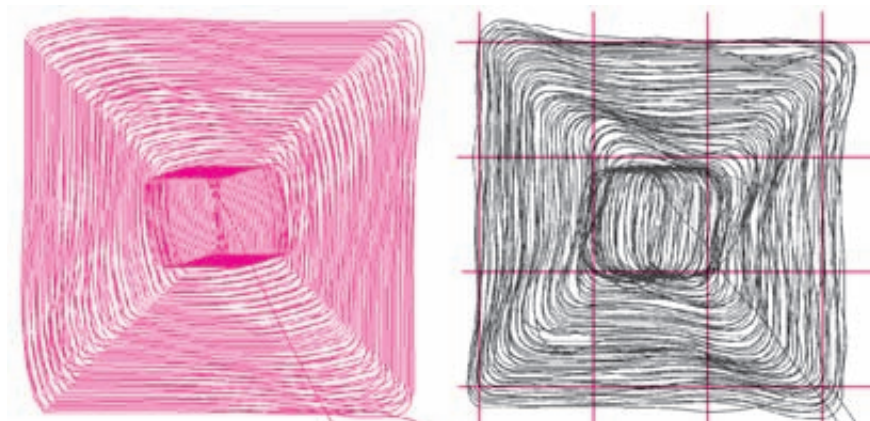


Рис. 10. Моделированная (слева) и реальная (справа) траектории движения АНПА спиралью и циклоидой для покрытия района сплошным фотографированием. Вид сверху. Размер клетки 100×100 м

ГБО): сходящейся спирали размером 320×320 м, с шагом 2 м, со скоростью 0,9 м/с на высоте 3 м от дна и циклоиды внутри неё размером 82×112 м, с шагом 2 м, со скоростью 0,8 м/с на той же высоте.

Зигзаг

Когда необходимо произвести поиск и последующую инспекцию подводной коммуникации с использованием бортовых средств обнаружения (ГБО, ЭМИ, фотосистемы), применяется зигзагообразная фигура, напоминающая змейку.

На рис. 11 изображены схема и основные параметры фигуры типа зигзаг:

A – длина фигуры; B – длина галса; C – ширина фигуры; D – количество галсов.

Галсы располагаются под углом 45° к направлению объекта обследования (кабеля), т.к. это обеспечивает наилучшие условия для работы ЭМИ и максимальную площадь фигуры (соответственно вероятность обнаружения объекта).

$$A = D \cdot B \cdot \cos 45^\circ.$$

$$C = B \cdot \sin 45^\circ.$$

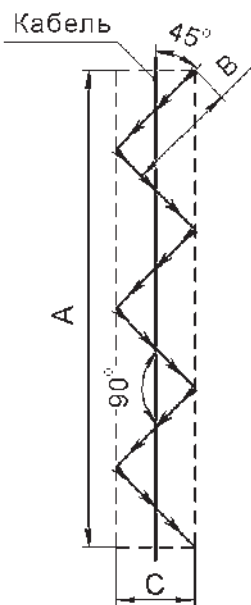


Рис. 11. Фигура типа зигзаг, используемая для обследования протяжённых объектов

Длина пути: $L = D \cdot B$.

Площадь фигуры:

$$S = A \cdot C = \frac{1}{2} \cdot D \cdot B^2.$$

Точка начала зигзага может располагаться по любую сторону от объекта на расстоянии $\frac{C}{2}$.

Ориентация фигуры выбирается вдоль направления объекта, которое должно быть известно ещё на этапе планирования. Длина галса B (размах фигуры) выбирается исходя из точности имеющихся координат.

После обнаружения первого контакта дальнейшее движение АНПА происходит по алгоритму, позволяющему постепенно уменьшать размах фигуры и идти вдоль объекта, находясь прямо над ним [8].

Проблема компенсации течений

Как упоминалось выше, галсы в траекториях покрытия следует ориентировать вдоль направления предполагаемого течения. Однако в некоторых случаях это не всегда возможно, к тому же в ходе выполнения длительных миссий течение может неоднократно менять своё направление.

Траектория движения АНПА во многих случаях задаётся как последовательность путевых точек. При этом для организации движения аппарата в каждый момент времени направление на очередную целевую точку принимается в качестве заданного. Однако при наличии течения траектории движения от точки к точке будут представлять собой дуги (рис. 12), что является нежелательным при выполнении ГБО-съёмки. Для устранения этого явления был разработан алгоритм коррекции целевого курса, основанный на упреждении угла сноса [1]. В нём используются следующие положения.

1. Движение АНПА должно происходить строго по отрезкам, соединяющим смежные путевые точки.

2. Рассчитывается заданный путевой угол для прибытия АНПА в точку назначения. Заданный курс вычисляется с поправкой, учитывающей расхождение между заданным путевым углом и фактическим (который получается на основе показаний бортовой навигационной системы АНПА). Эта поправка позволяет аппарату подстраивать свой курс на каждой итерации для движения в нужном направлении. Компенсируя течение, АНПА не имеет данных о его направлении и силе, известно лишь отклонение от намеченного пути.

Результаты испытаний представлены на рис. 12. Показаны траектории, полученные в результате движения аппарата по одним и тем же целевым точкам, но с использованием разных алгоритмов движения. Линии синего цвета показывают заданный курс (вырабатываемый алгоритмом на каждой итерации движения), красные прямоугольники на траектории изображают положение и ориентацию корпуса АНПА. Видно, что при простом наведении лучи заданного курса пересекаются в целевых точках. Алгоритм стабилизации путевого угла подбирает курс таким образом, чтобы форма траектории была максимально приближена к заданной. Примечательно, что за время, прошедшее между этими двумя проходами, течение успело поменять своё направление.

Автоматизация покрытия акваторий произвольной формы

Для автоматизации составления миссий, направленных на исследование районов произвольной формы, применяются

алгоритмы покрытия. Результатом работы такого алгоритма является траектория движения, охватывающая заданный район, точки которого гарантированно попадают под зону действия бортовых устройств (рис. 13).

Первый этап работы алгоритма покрытия заключается в создании модели покрываемого района. Модель строится путём декомпозиции, т.е. разбиения района на структурные единицы (ячейки), для которых задача покрытия решается тривиально. Если доказано, что робот побывал в каждой из ячеек, объединение площадей которых равно общей площади района, то можно гарантировать полноту покрытия. В зависимости от формы ячеек (клетка, полоса, полигон) алгоритмы принципиально различаются [9, 10].

Входными данными для алгоритма покрытия являются:

- 1) границы района;
- 2) границы препятствий;
- 3) параметры шаблона покрытия (т.е. форма охвата поверхности поисковым устройством);
- 4) начальные позиции роботов (опционально).

Заход в область препятствий запрещён, в то время как за границы района робот может выходить в целях оптимизации покрытия. Границы задаются координатами полигонов. Выходные данные алгоритма покрытия – это траектория движения одного или нескольких АНПА, охватывающая заданный район.

Оптимальность результата, выдаваемого алгоритмом покрытия, оценивается по следующим критериям:

- 1) время работы алгоритма;
- 2) полнота покрытия (отношение площади, охваченной шаблоном, ко всей);
- 3) время, требуемое на покрытие (пропорционально длине пути и скорости);

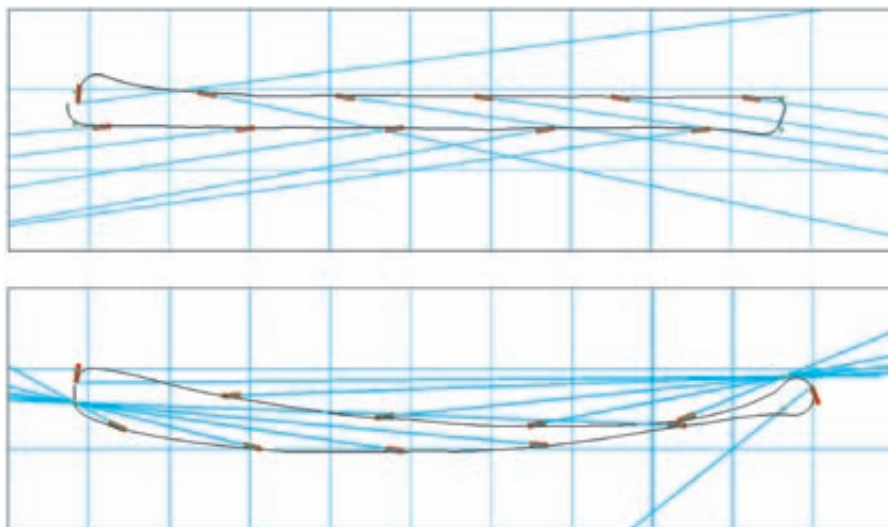


Рис. 12. Два взаимобратных галса с компенсацией течения (верхний) и без (нижний). Размер клетки 100×100 м

4) среднеквадратичное отклонение робота от заданной траектории (зависит от скорости, количества и крутизны поворотов);

5) требуемая энергия (зависит от времени, скорости и количества поворотов).

Среди известных алгоритмов покрытия наиболее подходящим для использования в подводной робототехнике является полигональный алгоритм Хуанга [11]. В данной работе показано, что оптимальное (по времени и количеству поворотов) направление покрытия для любого многоугольника совпадает с одним из направлений, образованных внешним или внутренним периметром.

На первом этапе работы алгоритма происходит декомпозиция целевого района на ячейки – выпуклые многоугольники, образованные внутренним и внешним периметрами. На втором этапе строится граф смежности, в котором вершины соответствуют полученным ячейкам, а рёбра – переходам между ними. На третьем этапе имеющийся граф разбивается на 2 различных подграфа, и для каждого варианта определяется оптимальное (по времени и количеству поворотов)

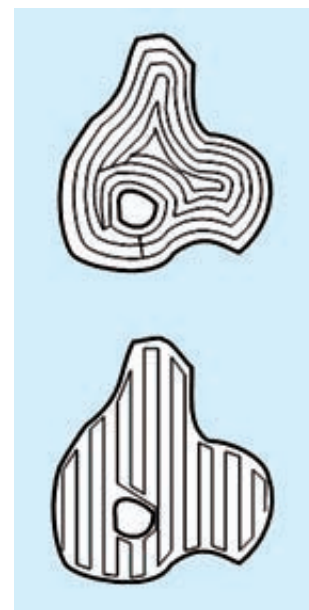


Рис. 13. Примеры работы алгоритмов покрытия

направление покрытия. Третий этап рекурсивно зацикливается методом динамического программирования для поиска наилучшего решения среди всех возможных комбинаций (рис. 14). Принято допущение, что затраты на переходы между ячейками являются несущественными, поэтому они не учитываются.

Алгоритм Хуанга эффективен, но предъявляет повышенные требования к вычислитель-

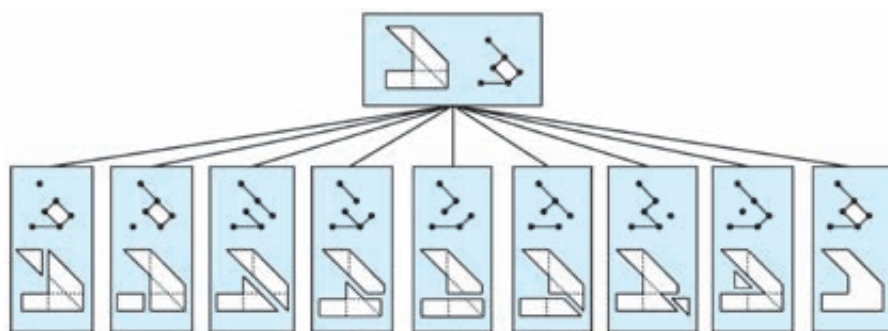


Рис. 14. Схема работы алгоритма Хуанга. Сверху показаны начальное разбиение района и соответствующий ему граф смежности. Снизу изображены все 8 способов разделения данного графа на 2 различных подграфа. Справа район представлен целиком

ным ресурсам. Это связано с применением метода динамического программирования и соответственно экспоненциальным ростом вычислительных затрат в зависимости от сложности покрываемого пространства. К другим недостатком алгоритма можно отнести его неприспособленность к задачам покрытия с плотным расположением галсов.

Для использования в составе рассматриваемых программных средств разрабатывается базирующийся на доказательствах Хуанга, но принципиально иной алгоритм покрытия. В целях увеличения быстродействия для поиска оптимума используется метод линейного программирования, что по-

зволяет отказаться от перебора (динамического программирования). Также в условия задачи вводятся дополнительные ограничения, учитывающие специфику движения в подводных условиях (динамические ограничения на маневры, наличие течения, ухудшение качества ГБО-изображений при выполнении циркуляций и т.п.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённые в статье типовые траектории и алгоритмы использовались при составлении миссий АНПА во время выполнения поисковых работ в районе о-ва Сахалин в 2009-2010 годах и показали свою эффективность

(см статью Кузнецова О.Л. и др. в настоящем номере журнала). Миссии на базе высокоуровневых функций успешно подготавливались операторами с относительно невысоким уровнем программистской квалификации. Симулятор наглядно демонстрировал операторам планируемое движение аппарата с учётом его динамических характеристик.

Практическое использование программного комплекса выявило также возможные направления дальнейшего развития, к которым можно отнести:

- пополнение набора типовых траекторий в плане использования АНПА в режиме зависания (движения с малой скоростью) в условиях течения;
- расширение возможностей инструментов моделирования и визуализации за счёт более тесного сопряжения с моделирующим комплексом [12];
- доработка алгоритмов покрытия для ускорения их работы и оптимизации прокладки плотной сети галсов.

Работы по созданию симулятора миссий, входящего в состав комплекса, выполнены при частичной поддержке грантов ДВО РАН: № 09-II-CO-03-001, № 09-III-A-01-006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Solar Powered Autonomous Underwater Vehicle (SAUV II) User Manual [Electronic resource]. URL: [http://www.falmouth.com/Manuals/SAUV/AUV%20II%20User%20Manual%20\(web\).pdf](http://www.falmouth.com/Manuals/SAUV/AUV%20II%20User%20Manual%20(web).pdf).
3. GAVIA User Software [Electronic resource]. URL: <http://www.gavia.is/Products/Gavia-Technology/User-Software/>.
4. Вагницкий А.В. Программная среда для моделирования и трёхмерного представления миссии автономного подводного робота // Материалы IV Всерос. школы-семинара молодых ученых «Проблемы управления и информационные технологии» (ПУИТ'08). Казань, 2008. С. 5-11.
5. Инзарцев А.В., Матвиенко В.Ю. Визуальная среда разработки заданий для автономных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2008. №1(5). С. 5-10.
6. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселёв Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.
7. Мун С.А., Щербатюк А.Ф.. О некоторых алгоритмах шивки подводных фото изображений, полученных с помощью АНПА // Материалы докл. II Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 296-301.
8. Inzartsev A.V., Pavin A.M. AUV Application for Inspection of Underwater Communications // Underwater Vehicles. Vienna: In-Tech Publishers, 2009. P. 215-234.
9. Howie Choset. Coverage for robotics – a survey of recent results // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2001. V. 31(1-4). P. 113-126.
10. Yeun-Soo Jung, Kong-Woo Lee and Beom-Hee Lee. Advances in Sea Coverage Methods Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) // Recent Advances in Multi-Robot Systems. Vienna: In-Tech Publishers, 2008. P. 69-100.
11. Huang W.H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms // Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. N.Y., 2001. P. 6.
12. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Медведев А.В. и др. Имитационный моделирующий комплекс для «интеллектуального» автономного подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 46-52.