

УДК 551.46.077 + 629.584
ББК 32.965.7

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ АНПА В ЗАДАЧЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Туфанов И. Е.¹, Щербатюк А. Ф.²

*(Институт проблем морских технологий,
Дальневосточное отделение РАН, Владивосток)*

В статье рассмотрена задача поиска и оценки размеров локальных неоднородностей в заданной акватории. Изложен подход, позволяющий не только локализовать, но также оценить 3D-размеры локальных неоднородностей и массу содержащегося в них растворенного вещества. Описан метод планирования работы группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при решении указанной задачи. Поставлена соответствующая задача дискретной оптимизации и приводится сравнение двух алгоритмов её решения. Рассмотрен вопрос о перепланировании действий группы в случае возникновения внештатных ситуаций в процессе выполнения задания. Приведены результаты моделирования работы предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: группа автономных необитаемых подводных аппаратов, групповое поведение, планирование, подводные локальные неоднородности.

¹ Игорь Евгеньевич Туфанов, аспирант (itufanov@gmail.com).

² Александр Федорович Щербатюк, чл.-корр. РАН, д.т.н., зав. лаб. (scherba@marine.febras.ru)

1. Введение

Одной из важных задач морского экологического мониторинга является поиск и обследование локальных неоднородностей (ЛН) в толще воды. Такие ЛН могут иметь как естественное происхождение (поле фитопланктона), так и быть вызванными антропогенным влиянием (поле загрязнения). Полагается, что на АНПА установлен датчик, позволяющий регистрировать концентрацию заданного вещества. Если концентрация вещества в некоторой точке превосходит некоторый порог, то предполагается, что эта точка принадлежит ЛН. Задача заключается в локализации ЛН и оценке ее размеров. Данная информация является важной для построения корректных моделей, как при организации контрмероприятий в случае загрязнения водных акваторий, так и при планировании рыбопромысловой деятельности на основе данных о полях фитопланктона.

Задаче обследования ЛН посвящены некоторые исследования и публикации. Например, в докладе [9] сравниваются параметрический и непараметрический подходы для оценки характеристик ЛН. В работах [1, 2] приводятся алгоритмы для оконтуривания областей ЛН и шлейфов, описаны способы формирования траектории движения АНПА, позволяющие построить локальную аппроксимацию границы области ЛН или оценить направление распространения шлейфа. В работе [6] рассмотрен алгоритм поиска и оценки размеров ЛН в заданной акватории для группы АНПА, который позволяет оценить объемы ЛН и количество растворённого в них вещества. В настоящей работе рассмотрены подходы к решению задачи эффективного планирования, которая возникает при выполнении указанного алгоритма группой АНПА. Имеется набор заданий и необходимо распределить их между аппаратами, указав для каждого аппарата план их выполнения, минимизирующий время миссии в целом. Поставлена соответствующая задача дискретной оптимизации. Рассмотрены вычислительно затрат-

ный точный алгоритм ее решения и вычислительно более эффективный эвристический алгоритм.

При выполнении АНПА заданий в динамической неструктурированной среде возможны непредвиденные ситуации и нарушения плана. Должен осуществляться постоянный контроль над выполнением плана и перепланирование в случае его нарушения. В настоящей работе рассмотрено перепланирование в случае выхода из строя одного из подводных аппаратов. При одновременной работе группы АНПА предполагается наличие постоянной акустической связи каждого исправного подводного аппарата с центральным узлом, которым может быть как судовой пост оператора, так и один из АНПА. Все АНПА оснащены навигационной системой, обеспечивающей требуемую точность определения местоположения АНПА.

2. Обзор существующих подходов

Вопрос распределения заданий внутри группы роботов (*multi-robot task allocation (MRTA)*) состоит в том, чтобы назначить имеющиеся задания (которые могут заключаться в требовании посетить заданную точку пространства, обследовать заданный участок и т. д.) роботам группы и определить порядок их выполнения. При этом необходимо минимизировать некоторый функционал, который может включать общее время выполнения задания, суммарный пройденный путь и т.д. В работе [15] приводится классификация задач *MRTA*. Показано, что, несмотря на разнообразие постановок, они чаще всего сводятся к широко известным задачам дискретной оптимизации, таким как задачи о назначениях или нескольких странствующих коммивояжёрах (*multiple travelling salesman problem (MTSP)* [25]).

Если весь набор заданий известен заранее, то может быть применено централизованное планирование. Так, в работе [23] рассматривается задача распределения неподвижных целей внутри группы летательных аппаратов. Необходимо посетить все цели, минимизировав функционал, который представляет собой взвешенную сумму максимального и суммарного време-

ни, затраченного всеми роботами. Задача формулируется в терминах целочисленного программирования, и предлагаются точный и приближённый методы решения задачи. Централизованное планирование в группе летательных аппаратов рассматривается и в работе [5], где решение похожей задачи предлагается разделить на три фазы: распределение заданий между аппаратами, решение задачи коммивояжёра для каждого аппарата, планирование пути между парами заданий. При этом задания разделены на точечные (их требуется посетить) и площадные (их обработка занимает некоторое время).

Другой класс алгоритмов — это алгоритмы коллективного планирования. Их использование целесообразно, например, для ситуаций, когда задания добавляются по мере работы группы или когда центральный узел недоступен. Такие алгоритмы предполагают некоторый процесс согласования при выборе заданий. Один из способов согласования в группировке роботов — аукционный метод. При появлении нового задания некоторые роботы делают «ставки», оценивая свои затраты для выполнения этого задания. Такие алгоритмы использованы в работах [17, 18]. Обзор аукционных методов проделан в работе [13]. В работах [3, 7, 10, 12, 14, 22, 24] приводятся алгоритмы решения специфических постановок задачи планирования и исследуются другие подходы.

Алгоритмы централизованного и коллективного планирования находят применение в системах управления группами роботов [8, 18, 20, 21, 26]. В системе *ALLIANCE* [21] рассматривается распределение заданий в группе разнородных роботов. Используются алгоритмы, основанные на «жадном» подходе, в котором каждый раз среди невыполненных заданий выбирается то, которое потребует наибольших или наименьших затрат. Развитие этой системы, *L-ALLIANCE*, использует механизмы машинного обучения для того, чтобы учитывать различия в способностях роботов. В работе [8] описана система *GRAMMPS*, в которой производится централизованное планирование. Для решения возникающих задач дискретной оптимизации предла-

гается использовать полные или частичные решения в зависимости от размера задачи.

Экспериментальный проект *CENTIBOTS* [20] посвящён управлению группой более чем из ста роботов для решения исследовательских задач в помещении. В каждый момент времени в системе имеется набор неподвижных целей, которые необходимо посетить. Планирование может осуществляться в двух режимах: централизованном и коллективном. В централизованном режиме план посещения целей строится на основе приближённого решения задачи *MTSP* с использованием «жадного» алгоритма. Коллективное планирование основано на методе аукционов. При этом отмечается, что в начале работы системы объем передаваемых об аукционах сообщений столь велик, что пропускная способность коммуникационной сети оказывается недостаточной. Система *MissionLab* используется в *Georgia Institute of Technology* для управления разнородными (летательными, наводными, подводными) аппаратами. Для решения задачи *MRTA* в ней используется аукционный метод [26].

Задача распределения заданий при управлении группой АНПА также рассмотрена в работах [4, 11, 19, 27]. В работе [4] исследована задача, в которой задано множество точечных целей на плоскости и необходимо разработать план посещения как можно большего их количества аппаратами группы. Ставится задача *MTSP*, для решения которой используется генетический алгоритм, позволяющий гибко задавать ограничения на траектории аппаратов. Работа [11] также посвящена построению плана для посещения группой АНПА нескольких точечных целей. При этом накладывается ограничение на кривизну траекторий АНПА и предлагается использовать аукционный метод. Алгоритм из этого семейства применён и в работе [27]. В [19] рассматривается решение задачи оптимизации порядка обследования с помощью АНПА нескольких площадных участков на основе метод оптимизации «колонией муравьёв».

3. Задача поиска локальных неоднородностей

Рассмотрим задачу обследования акватории на основе использования группы АНПА с целью выявления в ней локальных неоднородностей. Положим, что задана некоторая прямоугольная область $A = \{(x, y): x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\}$, которую необходимо осмотреть с помощью группы из m подводных аппаратов на предмет наличия ЛН. Предлагаемый алгоритм обследования включает три этапа.

Этап 1. Предварительный осмотр «грубым» меандром. Область A разбивается на m частей в соответствии с числом имеющихся АНПА (рис. 1):

$$A_i = \{(x, y): x_1 \leq x \leq x_2, y_1 + \frac{i-1}{m}(y_2 - y_1) \leq y \leq y_1 + \frac{i}{m}(y_2 - y_1)\}.$$

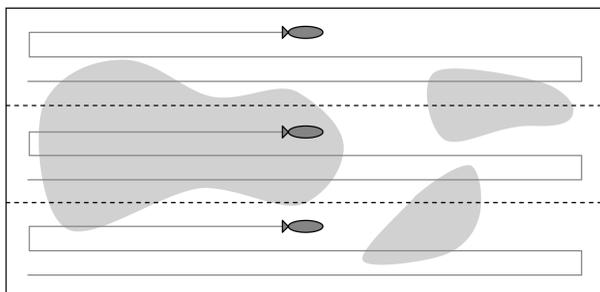


Рис. 1. Предварительный осмотр заданной области «грубым» меандром с помощью трех АНПА

Сформированные прямоугольные области распределяются между подводными аппаратами и организуется покрытие каждой области A_i горизонтальным меандром с шагом h между галсами. Шаг h выбирается равным половине размера минимальной области, которая может рассматриваться как ЛН.

Этап 2. На основе произведенных всеми подводными аппаратами измерений создается список точек пересечения границ ЛН. В данных точках траектории АНПА пересекают изолинии, соответствующие заданному порогу измеряемого параметра

водной среды. На основе данного набора точек грубо формируются связные области ЛН и оценивается их количество.

Используется следующий алгоритм формирования связных областей по набору параллельных сечений областей ЛН траекториями АНПА. Каждый принадлежащий области ЛН отрезок предыдущего параллельного галса меандра (верхний отрезок) сопоставляется с каждым принадлежащим области ЛН отрезком текущего параллельного галса меандра (нижний отрезок). Считается, что два отрезка принадлежат одной области, если выполнено условие $(A_1 - B_2) \cdot (A_2 - B_1) > 0$, где A_1, B_1 и A_2, B_2 – координаты левых и правых границ верхнего и нижнего отрезков. На рис. 2 приведена визуализация результатов после первых двух шагов работы группового алгоритма для примера на рис. 1.

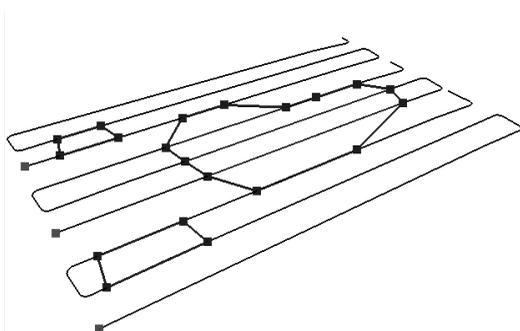


Рис. 2. Визуализация результатов после первых двух шагов работы группового алгоритма

Этап 3. Организуется детальное обследование выделенных ЛН с целью уточнения их размеров и местоположения. Для формирования траектории движения АНПА вдоль границ областей ЛН используется кусочная аппроксимация границы на основе нескольких последних точек пересечения границы. Оконтурирование области считается завершенным, если одновременно выполнены два условия: длина траектории оконтуривания больше некоторого заданного значения и расстояние от точки старта до точки окончания оконтуривания меньше некоторой константы.

Выделение трёхмерной области возможно выполнить путем локализации ее границ, полученных посредством сечения области ЛН несколькими параллельными плоскостями, соответствующими определенным фиксированным глубинам. Однако при этом продолжительность операции будет приблизительно линейно возрастать с количеством таких плоскостей. Вместо этого предполагается выполнить оконтуривание ЛН для некоторого наиболее вероятного значения глубины d_0 , которая пересекает интересующие нас области ЛН.

Каждый раз, когда заканчивается двумерное оконтуривание очередной ЛН, следует оценить ее объем и 3D-форму. Для этого используется следующая процедура. Предположим, что в процессе двумерного оконтуривания получена область Ω . Затем находится пара наиболее удаленных друг от друга точек границы области Ω (**a** и **b**). При этом отрезок, соединяющий **a** и **b**, должен быть целиком расположен внутри области ЛН. Далее производится двумерное оконтуривание в вертикальной плоскости, проходящей через точки **a** и **b**. Таким образом будет получено сечение искомой трехмерной области двумя перпендикулярными плоскостями (см. рис. 3).

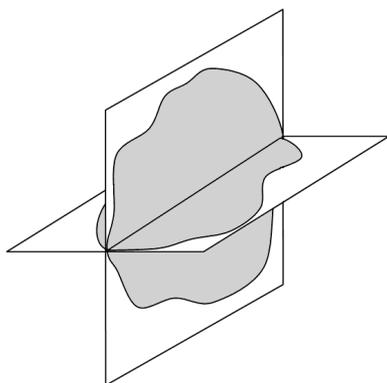


Рис. 3. Схема оконтуривания в двух перпендикулярных плоскостях

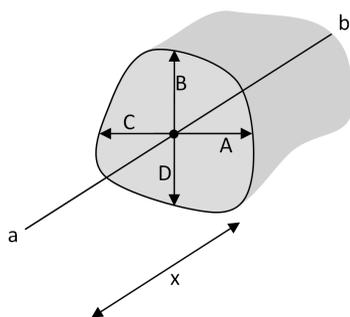


Рис. 4. Срез ЛН плоскостью, перпендикулярной диаметру

Для получения оперативной оценки объема ЛН выполняется аппроксимация границ фигур, образованных сечениями области ЛН вертикальными плоскостями, перпендикулярными оси Ox . При этом каждая линия сечения описывается функцией $\rho(\varphi)$, заданной отдельно в каждой четверти в полярных координатах. Она использует точки пересечения с осями Oy и Oz – $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $D(x)$ (см. рис. 4) и имеет вид

$$\rho(\varphi) = \sqrt{E^2 \cos^2 \varphi + F^2 \sin^2 \varphi},$$

где для первой четверти $E = A(x)$, $F = B(x)$, для второй – $E = B(x)$, $F = C(x)$, для третьей – $E = C(x)$, $F = D(x)$ и для четвертой – $E = D(x)$, $F = A(x)$.

Затем рассчитываются площади полученных фигур и далее оценивается объем области ЛН путем численного интегрирования. Для оценки количества растворенного в воде вещества подводные аппараты совершают дополнительные сквозные пересечения областей ЛН. На основе полученной аппроксимации функции концентрации растворенного вещества внутри областей ЛН выполняется оценка количества содержащегося в области ЛН вещества также посредством численного интегрирования.

4. Планирование групповой работы АНПА

В общем случае под планированием понимается процесс выработки последовательности действий, позволяющий выполнить поставленную задачу. В случае планирования действий группировки роботов этот процесс состоит из нескольких частей. При этом необходимо произвести «декомпозицию цели», разбив её на задания. Затем следует выработать последовательность выполнения заданий для каждого робота. Среди всех планов требуется выбрать тот, который минимизирует некоторый функционал (например, суммарный пробег всех АНПА). Наконец, следует осуществлять контроль над выполнением плана и его корректировку в случае возникновения непредвиденных ситуаций.

При решении рассматриваемой нами задачи (а именно, при выполнении этапа 3), целью является обследование всех найденных на предварительном этапе ЛН. Самая простая декомпозиция цели – это отдельное обследование каждой ЛН. Можно произвести ещё большую детализацию цели и рассмотреть обследование каждой ЛН как три независимых задания: горизонтальное оконтуривание, вертикальное оконтуривание и сквозной проход. Будем придерживаться принципа неделимости заданий: каждое задание требует непрерывного выполнения от начала до конца и один АНПА не может приступить к выполнению нового задания, не окончив предыдущего.

Имея набор неделимых заданий, необходимо распределить их между аппаратами и выбрать последовательность их выполнения. При работе нескольких аппаратов необходимо скоординировать их деятельность таким образом, чтобы по возможности минимизировать время, необходимое для выполнения всей миссии. Поскольку параметры ЛН заранее неизвестны, нельзя точно определить время, которое займёт выполнение каждого задания. Будем оценивать его, исходя из оценки размеров ЛН, полученных на этапе 2.

При постановке задачи оптимизации необходимо учесть, что имеется несколько вариантов выполнения. Например, не имеет значения, в каком направлении осуществлять сквозной проход. Таким образом, можно говорить о том, что при w локальных неоднородностях имеется $3w$ заданий, каждое из которых должно быть выполнено одним из аппаратов. При этом задания имеют различные варианты выполнения, отличающиеся начальными и конечными точками, и каждое задание имеет оценку времени его выполнения.

Пусть имеется m аппаратов и n заданий. Изначально q -й аппарат находится в точке \mathbf{s}_q трёхмерного пространства. Для i -го задания известно v_i вариантов его выполнения. Далее, j -й вариант выполнения i -го задания характеризуется начальной точкой \mathbf{a}_{ij} в трёхмерном пространстве, конечной точкой \mathbf{b}_{ij} и временем выполнения l_{ij} .

Назовём *планом* аппарата кортеж пар $p = (i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_{|p|}, j_{|p|})$ такой, что $i_k \in \{1, \dots, n\}$, $j_k \in \{1, \dots, v_{i_k}\}$ для всех $k \in \{1, \dots, |p|\}$. Выполнение плана q -м аппаратом начинается в точке \mathbf{s}_q . Вначале аппарат переходит к точке $\mathbf{a}_{i_1 j_1}$ и выполняет j_1 -й вариант задания i_1 . Затем аппарат переходит к точке $\mathbf{a}_{i_2 j_2}$ и т.д. Выполнение плана заканчивается в точке $\mathbf{b}_{i_{|p|} j_{|p|}}$. Предполагается, что переход между точками пространства от одного задания к другому и от начальной точки выполняется по отрезку прямой (т.е. используется евклидово расстояние). Таким образом, время выполнения плана p аппаратом с номером q составляет:

$$t_q(p) = \sum_{k=1}^{|p|} l_{i_k j_k} + \frac{1}{V} (|\mathbf{s}_q - \mathbf{a}_{i_1 j_1}| + \sum_{k=2}^{|p|} |\mathbf{b}_{i_{k-1} j_{k-1}} - \mathbf{a}_{i_k j_k}|),$$

где V – скорость аппарата при свободном перемещении между точками пространства.

Назовём *общим планом* кортеж планов $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ такой, что каждое задание встречается среди его планов ровно один раз и ровно в одном варианте. Временем выполнения общего плана назовем $t(P) = \max_{q \in 1..m} t_q(p_q)$, поскольку миссию

можно считать завершённой только после того как все аппараты завершили работу. Задача состоит в том, чтобы при известных начальных положениях аппаратов, известных заданиях и вариантах их выполнения найти общий план P , минимизирующий $t(P)$.

5. Решение задачи оптимизации

Задача составления плана сходна с задачей *MTSP*, для которой существуют методы получения как точных, так и приближённых решений, которые описаны, например в [25]. Рассмотрим два алгоритма решения данной задачи.

Первый алгоритм доставляет точное решение задачи. Он основан на идее динамического программирования и представ-

ляет собой модификацию алгоритма Хельда–Карпа [16], решающего задачу коммивояжера (*TSP*). Постановка этой задачи такова: имеется полный граф (с множеством вершин V), каждому ребру которого сопоставлено число – стоимость ребра. Необходимо построить цикл минимальной стоимости, проходящий по всем вершинам ровно один раз. В алгоритме Хельда–Карпа предлагается решать задачу методом динамического программирования. Не ограничивая общности, будем строить искомый цикл, начиная с некоторой вершины $r \in V$, каждый раз добавляя к пути новую, еще не взятую вершину. Состояние такого процесса описывается (для фиксированного r) парой (r', V') , где r' – последняя добавленная вершина, а V' – множество уже добавленных вершин ($V' \subseteq V$). Обозначим за $B(r', V')$ стоимость минимального пути, описываемого парой (r', V') . Очевидно, что $B(r, \{r\}) = 0$. Остальные значения могут быть найдены с использованием простых правил перехода. Зная все значения $B(r', V)$ легко найти длину кратчайшего цикла, которая составит $\min_{r' \in V} (B(r', V) + c(r', r))$, где $c(r', r)$ – стоимость ребра из r' в r .

Вернёмся к нашей задаче для нескольких аппаратов. С помощью двоичного поиска задача сводится к следующей: найти план со временем выполнения не более T либо установить, что его не существует. Для решения последней задачи применим метод динамического программирования. Рассмотрим последовательное составление плана для каждого подводного аппарата, при этом будем осуществлять лишь такие переходы, при которых время выполнения не превысит T . Состояние системы описывается тройкой (q, S, \mathbf{u}) , где q – номер текущего аппарата; S – подмножество заданий, которые уже включены в план; \mathbf{u} – точка, в которой в конце текущего плана будет находиться аппарат q (точка может быть любым из $\sum_{i \in \{1, \dots, n\}} v_i + m$ элементов множества $\{\mathbf{b}_{ij}\}_{i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, v_i\}} \cup \{\mathbf{s}_i\}_{i \in \{1, \dots, m\}}$).

Далее положим, что $t_T(q, S, \mathbf{u})$ обозначает минимальное время плана для q -го аппарата в состоянии (q, S, \mathbf{u}) . Переход в новое состояние – это либо выбор очередного задания, не при-

существующего в S , либо переход к составлению плана для аппарата $q + 1$. Таким образом, имеем:

$$t_T(q, S, \mathbf{s}_q) = \begin{cases} 0, & \text{если } \min_{\mathbf{u}} t_T(q-1, S, \mathbf{u}) \neq \infty, \\ \infty, & \text{если состояние не достижимо;} \end{cases}$$

$$t_T(q, S, \mathbf{b}_{ij}) = l_{ij} + \min(t_T(q, S \setminus \{i\}, \mathbf{s}_q) + \frac{1}{V} |\mathbf{s}_q - \mathbf{a}_{ij}|,$$

$$\min_{i \in S \setminus \{i\}} \min_{j_1 \in 1..v_{i_1}} (t_T(q, S \setminus \{i\}, b_{i_1 j_1}) + \frac{1}{V} |\mathbf{b}_{i_1 j_1} - \mathbf{a}_{ij}|)),$$

где $i \in S$. При этом переходы осуществляются только в том случае, если получаемое значение $t_T(q, S, \mathbf{u})$ не превосходит T .

Схема алгоритма для фиксированного T такова. Инициализируется значение $t_T(1, \{\}, \mathbf{s}_1) = 0$ и t_T для всех остальных индексов вычисляется в порядке неубывания q и неубывания $|S|$ для фиксированного q .

Второй алгоритм представляет собой модификацию аукционного метода для централизованного планирования. В данном случае все имеющиеся задания упорядочиваются. Каждое очередное задание во всех вариантах выполнения добавляется к уже существующему частичному плану каждого аппарата. Аппарат, имеющий минимальную стоимость частичного плана после вставки нового задания, объявляется выигравшим «аукцион», и задание назначается ему. Таким образом, для каждого задания перебирается:

- аппарат, которому следует назначить задание;
- позиция нового задания в текущем плане аппарата;
- вариант выполнения задания, который следует применить.

При работе в реальных условиях возможно возникновение непредвиденных ситуаций. К непредвиденным ситуациям можно отнести более долгое, чем планировалось время выполнения задания или отказ одного из аппаратов. Выход АНПА из строя (с последующим всплытием) случается по ряду причин: столкновение с рельефом, сбой ПО, аварийная ситуация на борту. В работе [22] излагается опыт выполнения поисковой операции с использованием трёх АНПА одновременно. При этом более чем

из сотни пусков приблизительно треть заканчивалась неудачно. При выходе аппарата из строя важно, чтобы остальные аппараты продолжили выполнять миссию, произведя перепланирование. Мы не рассматриваем ситуацию выхода из строя центрального узла.

Предполагается, что с некоторой периодичностью АНПА передают центральному узлу акустический сигнал. Если аппарат не передал сигнал в течение достаточно длительного времени, то принимается решение о перепланировании. При этом все ещё невыполненные задания перераспределяются, и новые планы рассылаются аппаратам.

В соответствии с принципом неделимости заданий, при перепланировании следует учесть, что некоторые аппараты могут быть доступны не сразу, а только после завершения их текущих заданий. Это влечёт к простым модификациям в приведённых выше алгоритмах планирования. В общем случае центральный узел должен осуществлять постоянный контроль над выполнением плана, и если происходит достаточно сильное от него отклонение, следует выполнять перепланирование.

6. Некоторые результаты моделирования

Для исследования предложенных алгоритмов было выполнено компьютерное моделирование их работы. При этом для расчета перемещения АНПА использовалась кинематическая модель с ограниченными линейной и угловыми скоростями. Локальные неоднородности были заданы аналитической формулой.

Моделирующая система представляет собой программную среду, в структуре которой имеются такие модули, как модель среды, модель аппарата, модель поведения и прочее. Таким образом, структура полученной системы позволяет ее модифицировать для применения к разным типам АНПА.

Рассмотрим работу модели в объеме, ограниченном параллелепипедом $\{(x, y, z): 0 \leq x \leq 700, 0 \leq y \leq 500, 0 \leq z \leq 300\}$.

Аналитическое выражение для описания ЛН имеет вид (рис. 5):

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^5 \frac{\alpha_i}{\beta_i + |\mathbf{x} - \gamma_i|^2},$$

где $\alpha = (5000, 5000, 5000, 4000, 5000)^T$,

$\beta = (5000, 5000, 5000, 5000, 5000)^T$,

$$\gamma_1 = \begin{pmatrix} 150 \\ 250 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_2 = \begin{pmatrix} 350 \\ 320 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_3 = \begin{pmatrix} 400 \\ 200 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_4 = \begin{pmatrix} 610 \\ 100 \\ 120 \end{pmatrix}, \gamma_5 = \begin{pmatrix} 620 \\ 400 \\ 180 \end{pmatrix}.$$

Здесь α , β , γ_i – векторы числовых параметров; \mathbf{x} – точка трёхмерного пространства.

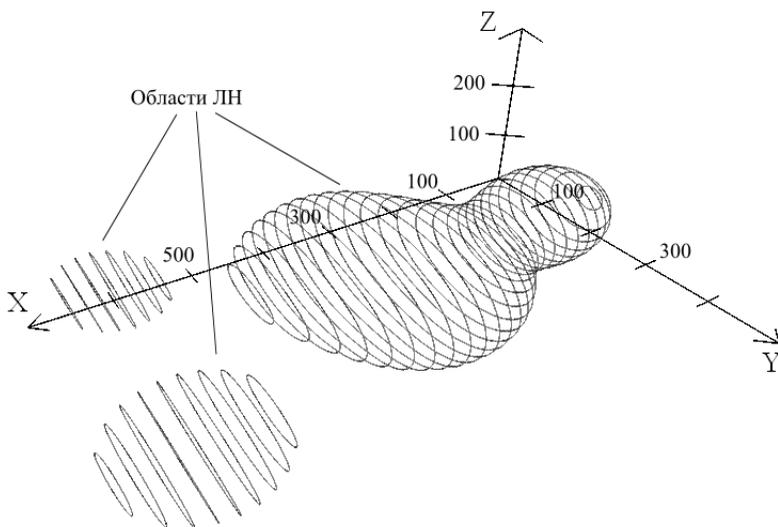


Рис. 5. Визуализация модельного примера. Области ЛН визуализированы с помощью сечений их границ плоскостями, параллельными друг другу и плоскости YZ

Для оконтуривания областей ЛН использовался порог значения поля на уровне 0,7, количество подводных аппаратов в

эксперименте было выбрано равным трем, шаг меандра был принят равным 50. В качестве рабочей глубины было выбрано значение $d_0 = 150$.

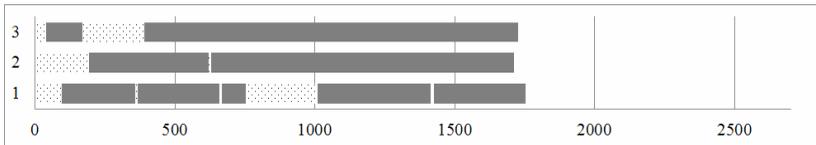
После предварительного прохода меандром было выявлено три области ЛН. Затем после горизонтального и вертикального оконтуривания и прохода через область ЛН на основе полученных модельных измерений была произведена оценка объемов выделенных областей ЛН и массы содержащегося в них растворенного вещества. Для этого использовались численные методы интегрирования.

Далее исследовалось, насколько точным является предложенный метод оценки указанных выше параметров. Получаемая ошибка складывается из ошибки оконтуривания (она зависит от траектории, которая получается после сглаживания) и от ошибки самого метода вычисления объема (эта ошибка зависит от выбранных плоскостей сечения и от формы области). Выяснено, что суммарная ошибка в среднем составляет около 12%. Следует отметить, что настоящая модель не учитывает погрешности измерений и навигации. Аналогичная ошибка оценки количеств растворенного в областях ЛН вещества оставляет около 20%. Данные точности являются достаточным для оперативной оценки параметров ЛН на предварительном этапе обследования.

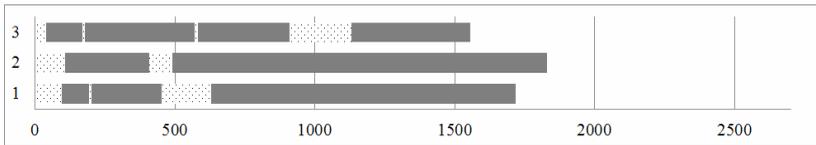
При решении задачи планирования длина пути при оконтуривании оценивалась как периметр многоугольника для каждой ЛН, полученной на этапе 2, длина сквозного прохода оценивалась как диаметр этого многоугольника, а длина пути при вертикальном оконтуривании – в π раз больше диаметра. На рис. 6 представлены результаты работы алгоритмов планирования для ЛН, описанной выше и состоящей из трех областей. В данном случае имеется девять неделимых заданий, включающих для каждой области горизонтальное и вертикальное оконтуривание, а также сквозное пересечение области. Вдоль временной шкале отображены результаты распределения заданий. Разрывы между некоторыми заданиями минимальны – это задания по оконтуриванию одной и той же ЛН. Можно заметить, что стоимость

плана, полученная алгоритмом 1 всего на ~4% ниже, чем стоимость плана по алгоритму 2.

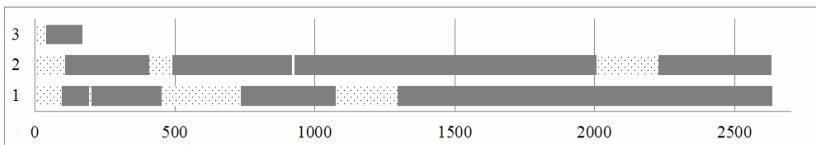
Далее рассматривается перепланирование в случае, когда аппарат 3 выходит из строя во время движения ко второму заданию. В соответствии с принципом неделимости заданий, аппараты 1 и 2 продолжают текущие работы, но дальнейшие их действия перепланируются полностью. Можно, например, заметить, что самое трудоёмкое задание (вертикальное оконтуривание самой большой ЛН) перемещается от второго аппарата первому. Следует отметить, что алгоритмы 1 и 2 в данном случае формируют одинаковые по стоимости планы.



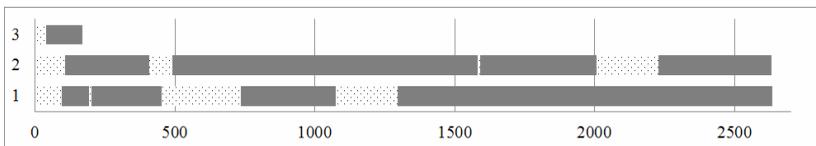
а)



б)



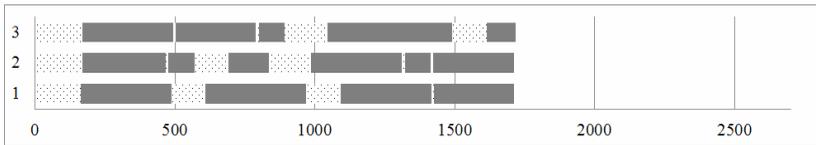
в)



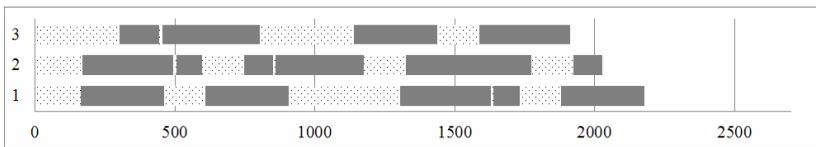
г)

Рис. 6. Планы, составленные предложенными алгоритмами для случая с тремя ЛН. По горизонтальной оси отложено время. Для каждого аппарата различными тонами отмечены промежутки времени для выполнения заданий и для перехода между заданиями: работа алгоритмов 1 и 2 в штатной ситуации [а) и б)], перепланирование по алгоритмам 1 и 2 при выходе аппарата 3 из строя в момент времени 300 [в) и г)]

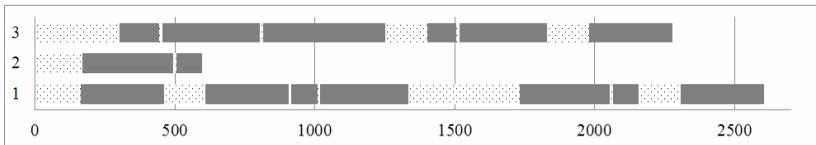
Затем было выполнено моделирование работы предложенных алгоритмов в случае, когда имеется пять приблизительно одинаковых по размеру ЛН. В данной ситуации имеется пятнадцать неделимых заданий. Результаты планирования при штатной работе ПА приведены на рис. 7 а) и б). В данном случае разница между эффективностью алгоритма 1 и алгоритма 2 более заметна. Ситуация с перепланированием в случае, когда аппарат 2 выходит из строя во время движения к третьему заданию приведена на рис. 7 в) и г).



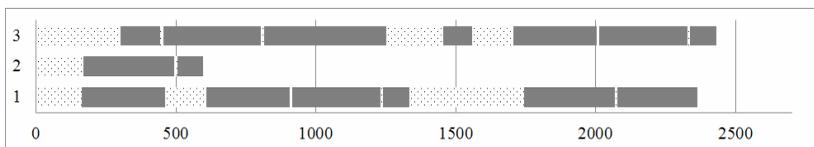
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Планы, составленные предложенными алгоритмами для случая с пятью ЛН. Работа алгоритмов 1 и 2 в штатной ситуации [а) и б)], перепланирование по алгоритмам 1 и 2 при выходе аппарата 2 из строя в момент времени 720 [в) и г)]

В обоих модельных примерах при использовании одного аппарата алгоритм 1 даёт решение со стоимостью приблизительно в 2,75 раза больше, чем при использовании трёх АНПА.

7. Выводы

Разработан и исследован метод для локализации и оценки размеров областей ЛН в заданной акватории с помощью группы АНПА. Для решения задачи обследования ЛН предложено два алгоритма планирования работы АНПА и произведено сравнение их эффективности на некоторых примерах. Приведены результаты работы алгоритмов в случае перепланирования. Следует отметить, что алгоритм 2 незначительно уступает алгоритму 1 по эффективности для рассмотренных примеров, но более прост в реализации и накладывает существенно меньшие требования к вычислительным ресурсам системы.

Отметим, что в настоящей статье рассмотрена централизованная схема управления группой аппаратов. Децентрализация является одним из альтернативных и перспективных путей дальнейшего развития алгоритмов группового управления.

Данная работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 100800249а.

Литература

1. БАБАК Л.Н., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием ав-*

- тономных необитаемых подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2010. – №5. – С. 74–78.
2. БАБАК Л.Н., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА* // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30.1. – С. 536–548.
 3. КАПУСТЯН С.Г. *Алгоритмы коллективного улучшения плана при решении задачи распределения целей в группе роботов* // Искусственный интеллект – 2006. – №3. – С. 679–690.
 4. КИСЕЛЕВ Л.В., ИНЗАРЦЕВ А.В., БЫЧКОВ И.В. и др. *Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов* // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – №2(8). – С. 34–43.
 5. ПОДЛИПЬЯН П.Е., МАКСМИМОВ Н.А. *Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов* // Труды МАИ. – 2011. – Вып. 43.
 6. ТУФАНОВ И.Е., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Об одном алгоритме обследования локальных неоднородностей морской среды с использованием группы АНПА* // Материалы 4-й всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». – Владивосток, 2011. – С. 371–375.
 7. BATALIN M.A., SUKHTAME G.S. *Sensor Network-based Multi-Robot Task Allocation* // IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), October 27–31, 2003, Las Vegas, USA. – P. 1939–1944.
 8. BRUMITT B.L., STENTZ A. *GRAMMPS: a generalized mission planner for multiple mobile robots in unstructured environments* // IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 16–20, 1998, Leuven, Belgium – Vol. 2 – P. 1564–1571.

9. CANNEL C.J., STILWELL D.J. *A comparison of two approaches for adaptive sampling of environmental processes using autonomous underwater vehicles* // Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference, September 18–23, 2005, Washington, USA. – Vol. 2 – P. 1514–1521.
10. CHATTY A., KALLEL I., ALIMI A.M. *Counter-Ant Algorithm for Evolving Multirobot Collaboration* // Proceedings of the 5th international conference on Soft computing as transdisciplinary science and technology, Cegry-Pontoise, France, October 27–31, 2008. – P. 84–89.
11. CHOW B., CLARK C.M., HUISSOON J.P. *Assigning Closely Spaced Targets to Multiple Autonomous Underwater Vehicles* // Proceedings of 16th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST09), August 23–26, 2009, Durham, USA.
12. DAHL T.S., MATARIC M.J., SUKHTAME G.S. *Multi-Robot Task-Allocation through Vacancy Chains* // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), September 14–19, 2003, Taipei, Taiwan. – P. 2293–2298.
13. DIAS M.B., ZLOT R., KALRA N., STENTZ A. *Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis* // Proceedings of the IEEE – Vol. 94, Issue 7. – 2006. – P. 1257–1270.
14. FURCY D., TOMAS G. *Designing Effective Heterogeneous Teams for Multiagent Routing Domains* // IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), August 22–27, 2011, Lyon, France. – Vol. 2 – P. 341–348.
15. GERKEY B.P., MATARIC M.J. *A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems* // The International Journal of Robotics Research – 2004. – Vol. 23, No. 9. – P. 939–954.
16. HELD M., KARP R. *A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems* // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – Vol. 10, No. 1. – 1962. – P. 196–210.

17. HOEING M., DASGUPTA P. *Dynamic Pricing Algorithms for Market based Distributed Task Selection in Multi-agent Swarms* // Proc. IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'06), Hong Kong. – 2006. – P. 113–116.
18. HOEING M., DASGUPTA P., PETROV P. et al. *Auction-based multi-robot task allocation in COMSTAR* // Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, May 14–18, 2007, Honolulu, USA.
19. HONG-JIAN W., LIN-LIN W., JUAN L. et al. *Autonomous Team Mission Planning for AUVs* // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, September 19–22, 2011, Kona, USA.
20. ORTIZ C.L., VINCENT R., MORISSE B. *Task Inference and Distributed Task Management in the Centibots Robotic System* // Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, July 25–29, 2005, Utrecht, Netherlands. – P. 860–867.
21. PARKER L.E. *ALLIANCE: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation* // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1998. – Vol. 14, Issue 2. – P. 220–240.
22. PURCELL M., GALLO D.; SHERRELL A. et al. *Use of REMUS 6000 in the Search for the Air France Flight 447 Wreckage* // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, September 19–22, 2011, Kona, USA.
23. RICHARDS A., BELLINGHAM J., TILLERSON M., HOW J. *Coordination and control of multiple UAVs* // AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control, August 5–8, 2002, Monterey, USA.
24. SUJIT P.B., SINHA A., GHOSE D. *Multiple UAV Task Allocation using Negotiation* // Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems AAMAS-2006, Hakodate, Japan, May 8–12, 2006. – P. 471–478.
25. *The Travelling Salesman Problem and Its Variations* / G. Gutin, A.P. Punnen Eds. – Springer, 2002. – 830 p.

26. ULAM P., ENDO Y., WAGNER A. et al. *Integrated Mission Specification and Task Allocation for Robot Teams - Design and Implementation* // IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10–14, 2007, Roma, Italy – P. 4428–4435.
27. YUEYUE D., BEAUJEAN P., AN E. et al. *Task allocation and path planning for collaborative AUVs operating through an underwater acoustic network* // Proceedings of the OCEANS 2010 MTS/IEEE Conference, September 20–23, 2010, Dania Beach, USA.

DEVELOPING ALGORITHMS OF AUVS GROUP BEHAVIOUR FOR UNDERWATER LOCAL HETEROGENEITIES SURVEY PROBLEM

Igor Tuphanov, Institute for Marine Technology Problems FEB RAS, post-graduate student (ituphanov@gmail.com).

Alexander Scherbatyuk, Institute for Marine Technology Problems FEB RAS, PhD, head of laboratory (scherba@marine.febras.ru).

Abstract: A problem of search and size estimation of underwater local heterogeneities in a given area is considered. We introduce an approach to both localize heterogeneities and to estimate their dimensions and mass of substance dissolved. We suggest the method for planning work of a group of autonomous underwater vehicles /AUVs/, solving this problem. The corresponding discrete optimization problem is stated and two solution algorithms are considered. We also discuss a question of group actions re-planning in case of emergencies during an operation. The results of modeling for considered algorithms are provided.

Keywords: group of autonomous underwater vehicles, group behavior, planning, underwater local heterogeneities.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В. Ю. Рутковским