

УДК 551.46.077 + 629.584

ББК 32.965.7

ОБ АЛГОРИТМАХ ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРУППЫ АНПА

Туфанов И.Е.¹, Щербатюк А.Ф.²

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

В статье рассмотрена задача измерения с требуемой точностью указанных параметров водной среды на основе использования группы автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/ с целью последующего картографирования в пределах заданной области. Описан метод планирования работы группы АНПА при решении указанной задачи. Рассмотрен вопрос о перепланировании действий группы по мере выполнения задания отдельными АНПА. Приведены результаты моделирования работы предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: группа автономных необитаемых подводных аппаратов, групповое поведение, планирование, измерение параметров среды.

1. Введение

В процессе выполнения экологического мониторинга водных акваторий и при проведении подводных биологических исследований важной задачей является измерение с требуемой точностью указанных параметров водной среды с целью последующего картографирования. Объектами съемки могут быть

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

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

поля температуры, солености, глубины, концентрации загрязняющих веществ.

В последние годы в качестве носителя измеряющего датчика все чаще применяется АНПА. Это обеспечивает возможность формирования произвольных программных пространственных траекторий на основе текущих измерений параметров среды и, следовательно, получения более высокого разрешения. Для повышения производительности и надежности выполнения задания используются группы АНПА. Их работа основана на использовании систем подводной акустической связи, посредством которых АНПА обмениваются результатами измерений при планировании поведения.

Различным вопросам измерения полей посвящено множество работ. Они различаются не только методами решения, но и постановками задач. Один из подходов к измерению параметров поля – случайное блуждание. В докладе [11] рассматривается задача измерения поля с использованием одного датчика, свободно перемещающегося по заданной области. Вся область делится на участки. При этом точка для каждого следующего измерения выбирается случайно, но плотность вероятности этого выбора зависит от результатов предыдущих измерений. Затраты на перемещение датчика от одной точки измерения до другой не учитываются.

Другой подход использует итерационные процедуры, в которых на каждом шаге формируется новая точка для измерения, при этом оптимизируется некоторая информационная метрика. Такой подход используется в работах [9, 13, 14], которые различаются используемыми метриками и алгоритмами поиска оптимального решения. К итерационным относится и алгоритм, предложенный в работе [6]. Ставится задача измерения поля для последующего восстановления с заданной точностью (при определенных условиях на гладкость). Предполагается использование нескольких АНПА, при этом на каждом шаге алгоритма для каждого АНПА происходит выбор следующей точки измерения. Вокруг каждого аппарата строится окружность доверительного радиуса и на ней выбирается точка. Доверительный радиус рассчитывается исходя из требуемой погрешности вос-

становления на основе оценки ошибки восстановления поля методом радиальных базисных функций. Выбор конкретных точек на окружности осуществляется путем минимизации функционала, «притягивающего» аппараты к тем точкам рассматриваемой области, которые еще не находятся ни в одной доверительной окружности. Если таких точек нет, то алгоритм завершает свою работу. Таким образом, время, необходимое для перехода от одной точки измерения до другой не учитывается и не ставится задача его минимизации. Более того, на каждом шаге алгоритма требуется синхронизация аппаратов: расчет следующего шага должен быть осуществлен только тогда, когда все АНПА выполнили предыдущий шаг. В работе [5] описанный подход развивается для случая ограниченного радиуса коммуникации между аппаратами: движение осуществляется так, чтобы граф коммуникации оставался связным. Существуют также подходы к обследованию областей сложной формы [8, 10].

В настоящей работе предлагается подход к измерению заданного поля с использованием группы АНПА, работающий на основе следующих предположений:

- рассматривается двумерная задача измерения поля в плоскости заданной глубины;
- в области прямоугольной формы задано поле, различные участки которого характеризуются различными статистическими характеристиками;
- для съемки используется группа АНПА, при этом возможно изменение числа АНПА в произвольный момент времени в процессе выполнения задания;
- каждый АНПА оснащен датчиком, измеряющим поле вдоль траектории движения с требуемыми точностью и частотой, системой акустической и радиосвязи, а также навигационной системой, обеспечивающей определение местоположения подводных аппаратов с необходимой точностью.

Рассмотрены алгоритмы, позволяющие выполнить измерение заданного поля без пробелов с требуемой точностью и при

этом минимизировать время выполнения съемки. Результатом выполнения миссии является карта поля, построенная по данным измерений после выполнения миссии. В первой части статьи рассмотрены вопросы оптимизации группового взаимодействия при решении задачи измерения поля. Далее выполнено сравнение вариантов жесткого и адаптивного формирования траекторий движения АНПА, в соответствии с различными статистическими характеристиками поля. В заключительной части приведены некоторые результаты моделирования.

2. Организация работы группы АНПА

При использовании группы однородных АНПА для выполнения задания появляется возможность повысить скорость и надежность выполнения миссии по сравнению с применением одиночного аппарата. Увеличение скорости выполнения миссии достигается путем оптимизации времени ее выполнения. Надежность или вероятность успешного выполнения миссии обеспечивается контролем ее выполнения и корректировкой в случае возникновения внеплановых ситуаций. Для этого используется планировщик, расположенный в центральном узле и имеющий информацию о миссии и о ходе ее выполнения.

Миссия АНПА может быть разбита на составные части (задания), которые выполняются параллельно различными аппаратами. Это приводит к уменьшению времени выполнения операции. В работе [2] показано, как это может быть сделано для задачи поиска локальных неоднородностей морской среды. Ниже рассмотрено, как осуществить такое разбиение при обследовании акватории с использованием адаптивных траекторий, формируемых в режиме реального времени на основе текущей информации об измеряемом поле.

Задание для АНПА может заключаться в выполнении определенного галса, покрытия заданного участка меандром, следованию вдоль протяженного объекта, возвращению в точку старта и т.д. При планировании операции существенным является время выполнения задания и время, необходимое для переходов между заданиями. Таким образом, для каждого задания

необходимо знать место начала его выполнения, место окончания его выполнения и время, необходимое для его выполнения. В случае если некоторые из этих параметров неизвестны (например, время, необходимое для выполнения галса в процессе адаптивного формирования траектории), следует получить их оценку и использовать ее при планировании.

Пусть имеется m аппаратов и n заданий. Изначально q -ый аппарат находится в точке $\mathbf{s}_q$ пространства координат. Для оценки стоимости переходов, положим, что имеется функция $\rho(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, обозначающая время перехода АНПА от точки $\mathbf{a}$ к точке $\mathbf{b}$. Она может иметь простой вид, например $\rho(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = |\mathbf{a} - \mathbf{b}| / V$, где V – максимальная скорость АНПА, или более сложный. Положим, что для i -ого задания дано v_i вариантов его выполнения. Пусть j -ый вариант выполнения i -ого задания характеризуется тройкой $(\mathbf{a}_{ij}, \mathbf{b}_{ij}, l_{ij})$, обозначающей соответственно точку начала задания, точку окончания и оценку времени его выполнения.

Планом аппарата назовем кортеж $p = (i_1, j_1), \dots, (i_{|p|}, j_{|p|})$ такой, что $i_k \in 1..n$, $j_k \in 1..v_{i_k}$ для всех $k \in 1..|p|$. План аппарата определяет его действия на протяжении миссии и однозначно определяется тем, какие варианты каких заданий будут выполняться и в каком порядке. Общий план – это кортеж планов всех аппаратов $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, в котором каждое из заданий встречается ровно один раз. Время $t(P)$ выполнения общего плана P – это время, которое проходит от начала миссии до выполнения своего плана каждым аппаратом, то есть:

$$t(P) = \max_{q \in 1..m} \left(\sum_{k=1}^{|p|} l_{i_k j_k} + \rho(\mathbf{s}_q, \mathbf{a}_{i_1 j_1}) + \sum_{k=2}^{|p|} \rho(\mathbf{b}_{i_{k-1} j_{k-1}}, \mathbf{a}_{i_k j_k}) \right).$$

Здесь первое слагаемое учитывает время выполнения заданий, второе – время на переход к первому заданию, третье – время на переходы между заданиями. Добавление еще одного слагаемого, $\rho(\mathbf{b}_{i_{|p|} j_{|p|}}, \mathbf{f})$, позволит построить план, предполагающий возвращение всех аппаратов на базу в точку $\mathbf{f}$. Таким образом, задача планирования выполнения миссии группой АНПА сво-

дится к следующему: по данным s_q , (a_{ij}, b_{ij}, l_{ij}) найти общий план P , минимизирующий $t(P)$.

Поставленная задача близка к задаче коммивояжера (travelling salesman problem /TSP/). Современные алгоритмы решения задачи коммивояжера описаны, например в [3]. Для нее существуют как точные, так и приближенные методы, многие из которых могут быть обобщены и для поставленной задачи. Соответствующее обобщение «аукционных» методов и одного из методов, использующих динамическое программирование, приведены в [2]. Генетические алгоритмы, решающие TSP, также могут быть модифицированы для решения поставленной задачи. Эффективные алгоритмы точного решения TSP используют LP-релаксацию исходной задачи: ставится более широкая задача линейного программирования и по мере нахождения ее решений отсекаются ложные области. Поставленная задача оптимизации работы группы АНПА имеет ряд отличий от классической TSP (основное – минимаксная постановка), не позволяющих использовать эти алгоритмы непосредственно.

Предполагается, что центральный узел решает соответствующую задачу оптимизации и отправляет информацию о планах всем АНПА. После завершения одним из АНПА миссии центральный узел должен осуществить перепланирование в случае, если имеются еще невыполненные задания. Это позволит уменьшить общее время выполнения работы. Кроме того, перепланирование необходимо в случае выхода одного из аппаратов из строя. При перепланировании все задания делятся на три класса:

- выполненные задания (не участвуют в новом плане);
- выполняемые в настоящий момент задания (не участвуют в новом плане, но при его составлении необходимо учитывать для каждого аппарата время, необходимое для завершения им текущей задачи и ту точку пространства, с которой аппарат может приступить к выполнению нового плана);
- невыполненные задачи (новый план будет состоять из них).

Таким образом, для успешной работы всего механизма группового управления необходима передача от центрального узла каждому АНПА его плана, а от каждого аппарата центральному узлу передача сообщений о начале выполнения задания, об окончании выполнения задания и периодических сообщений, подтверждающих активность аппарата.

3. Формирование траекторий обследования заданной области

Измерение заданного поля в области прямоугольной формы с использованием одиночного АНПА чаще всего осуществляется с помощью траектории типа меандр, которая позволяет достаточно просто организовать съемку в заданной области с минимальным количеством перекрытий. Она представляет собой набор длинных параллельных между собой галсов, соединенных короткими перпендикулярными галсами. Шагом меандра является расстояние между длинными параллельными галсами. При использовании такой траектории аппарат большую часть времени перемещается по прямолинейной траектории и выполняет измерения вблизи некоторой регулярной сетки, что позволяет использовать широкий спектр алгоритмов интерполяции для картографирования полученных данных. При движении постоянным меандром шаг подбирается перед началом операции на основе априорной информации таким образом, чтобы на основе полученных измерений можно было восстановить поле с требуемой точностью.

Из требования измерения поля с заданной точностью за оптимальное время вытекает необходимость более информативные области, в которых измеряемый параметр изменяется значительно сильнее, обследовать более частым покрытием, а менее информативные – более редким покрытием. Для этого предложено использовать траекторию типа меандр с переменным шагом, который предлагается формировать в соответствии с текущей характеристикой информативности поля. Задача при этом заключается в необходимости планирования движения таким образом, чтобы с одной стороны исключить возможность

пропуска отдельных участков, а с другой стороны – минимизировать области перекрытий.

Для решения данной задачи разработан алгоритм [12], позволяющий формировать для каждого АНПА траекторию движения типа меандр с переменным шагом, который с одной стороны позволяет минимизировать область перекрытий при смене шага меандра, а с другой – обеспечивает съемку без пробелов. Данный алгоритм использует несколько уровней детализации, количество которых ограничено некоторым минимальным шагом меандра h_{min} . При этом шаги меандра для соседних уровней детализации связаны между собой соотношением: $h_{i+1} = h_i / 3$. На рис. 1 показана используемая траектория типа комбинированный меандр с переменным шагом. АНПА начинает съемку заданного участка обычным меандром с максимальным шагом h_1 (галсы A , B и C). Если в процессе съемки (галс B) будет обнаружен более изменчивый участок поля, то для его съемки АНПА организуется маневр меандром с шагом h_2 . При этом выполняются галсы B_1 - B_5 . В процессе выполнения данного маневра может возникнуть необходимость в еще более детальной съемке, которая реализуется аналогично меандром с шагом h_3 (галсы B_{41} - B_{45}) и так далее пока не будет достигнут меандр с шагом h_{min} .

Для принятия решения об изменении шага меандра предположим, что измеряемое поле Z является реализацией случайного процесса. Такой подход применяется в геостатистике [1]. Если характеристики случайного процесса одинаковы во всей рассматриваемой области, то он является стационарным. В нашем случае предположение о различных статистических характеристиках Z на различных участках означает, что процесс не является стационарным. Расчет шага может быть выполнен с использованием локальной (на основе d последних измерений) оценки автокорреляционной функции /АФК/:

$$R(k) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{d-k} (z_{j+k} - \bar{z}) \cdot (z_j - \bar{z}),$$

где σ^2 – текущая дисперсия измеренных данных. На основе полученной АФК можно рассчитать радиус корреляции r , кото-

рый равен дистанции, в пределах которой АФК превышает некоторый порог H . Радиус корреляции определяет размеры области, в которой с требуемой точностью может быть выполнена аппроксимация данных. На основе полученного радиуса корреляции определяется уровень меандра i : $r_i < r \leq r_{i-1}$. Здесь r_i и H определяются на основе априорной информации или адаптивно, на основе текущих измерений. На основе полученных оценок принимается решение об изменении текущего уровня меандра и его шага на более высокий или низкий.

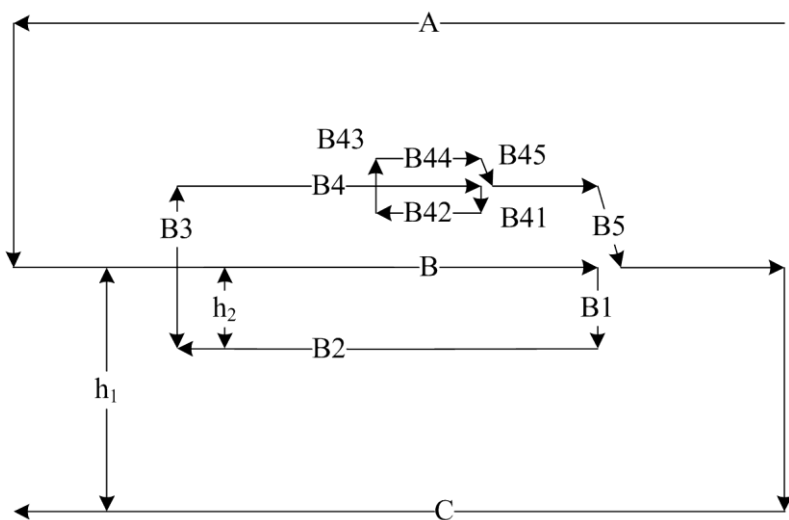


Рис. 1. Траектория движения типа меандр с переменным шагом для АНПА

4. Результаты моделирования

Для исследования работоспособности предложенных алгоритмов было выполнено компьютерное моделирование. При формировании движения аппарата применялась кинематическая модель. Для описания среды использовались модельная и реальная батиметрическая растровые карты размером 700 на 1200

точек. Число подводных аппаратов, задействованных при моделировании, было равно трем. Рассмотрена модель системы с тремя уровнями меандров. В качестве неделимого задания был принят галс меандра.

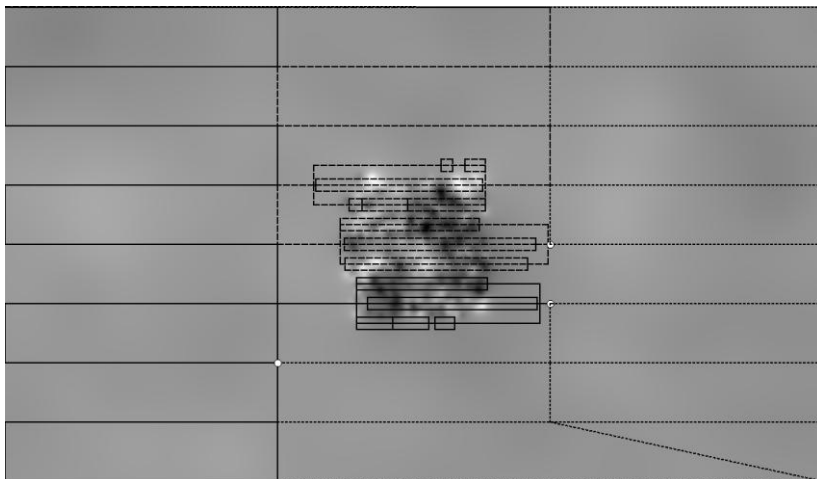


Рис. 2. Результаты работы алгоритмов в процессе съемки модельной карты на основе применения группы АНПА

На рис. 2 приведены траектории движения группы из трех АНПА, сформированные в процессе съемки модельной карты в процессе одного из экспериментов. Искусственные данные были получены путем сложения случайно сгенерированных возмущений двух видов, убывающих по квадратичному закону. Одни возмущения были случайно распределены по всей карте и имели масштабы, сравнимые с ней. Возмущения второго вида более локальны и распределены в квадрате, занимающем 5% площади общей карты. Данная карта имеет высокоинформативную область в центре.

Все АНПА начинают работу, находясь в верхнем левом углу заданной прямоугольной области. Траектории первого, второго и третьего АНПА, которым соответствуют номера 0, 1 и 2, отображены непрерывной, пунктирной и точечной линиями. Указанная область поделена между ними поровну на три части.

Миссия каждого АНПА состоит из 9 основных галсов. В результате имеется 27 заданий, пронумерованных от 0 до 26. На рис. 3 приведен автоматически сгенерированный отчет работы планировщика выполнения заданий. Верхняя диаграмма отображает предварительный план для каждого АНПА, в которой серыми прямоугольниками показаны задания с указанием выполняемого галса, а светлыми – переходы между заданиями. В процессе выполнения миссии раньше всех заканчивает выполнение задания первый АНПА. После этого на основе анализа времени, необходимого для завершения выполнения заданий разными подводными аппаратами, выполняется перепланирование выполнения оставшихся заданий (вторая сверху диаграмма). Из нее следует, что в результате перепланирования первому аппарату добавлены задания 16 и 19, а третьему – задание 25, которые были изъяты из списка заданий второго аппарата.

Следующее перепланирование выполняется после завершения выполнения заданий третьим аппаратом – третья сверху диаграмма. Из нее следует, что в процессе выполнения заданий 16 и 13 первым и вторым аппаратами изменилась оценка времени окончания их выполнения. В результате текущего перепланирования задания 19 и 22 первого и второго АНПА были переданы третьему аппарату. Четвертая, пятая и шестая диаграммы соответствуют моментам завершения выполнения заданий третьим, вторым и первым аппаратами. Перепланирование при этом не производится потому, что все задания уже выполняются.

Затем было выполнено сравнение адаптивного (меандр с переменным шагом) и неадаптивного (меандр с постоянным шагом) алгоритмов при примерно равной суммарной длине траектории, пройденной всеми АНПА. Результаты сравнения приведены в таблице 1. Из табличных данных видно, что карта, восстановленная после сбора данных с применением адаптивного алгоритма, более точна, нежели карта, полученная для неадаптивного алгоритма.

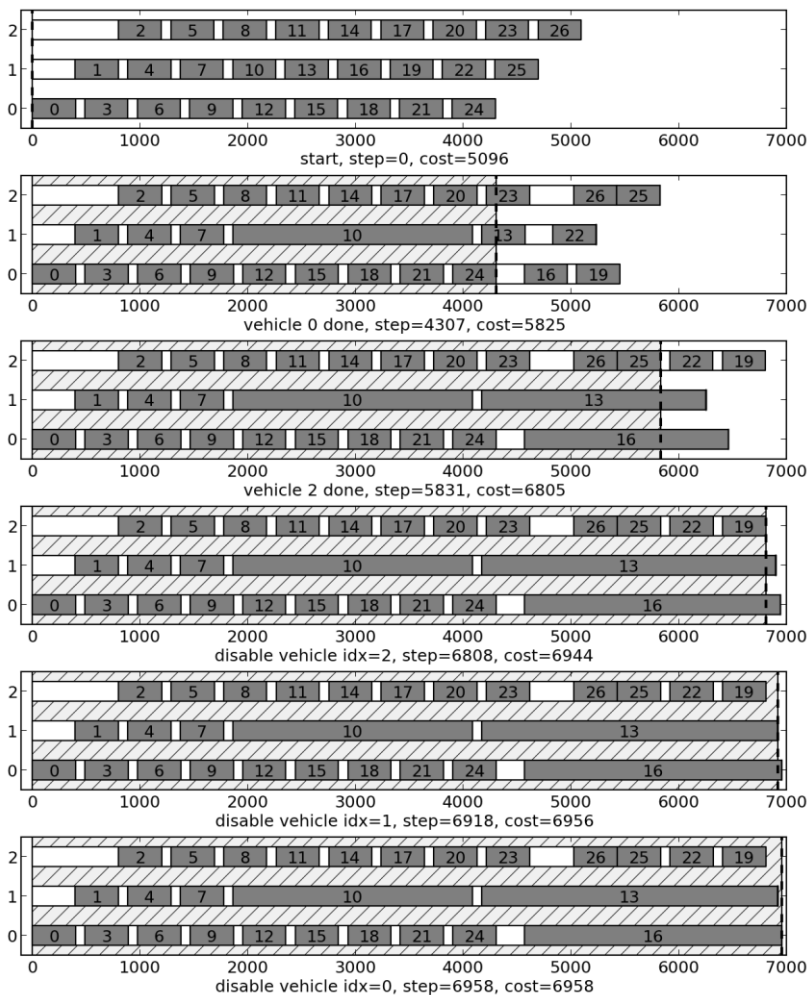


Рис.3. Автоматически сгенерированный отчет работы планировщика при работе с модельной картой

Таблица 1. Сравнение ошибок восстановления карты для адаптивного и неадаптивного алгоритмов при приблизительно одинаковой длине траектории

	Исходная карта	Ошибка адаптивного алгоритма	Ошибка неадаптивного алгоритма
Минимум	-3480.59	-651.37	-2267.83
Максимум	2507.87	753.68	2269.35
Среднее	22.53	-0.6	-4.53
СКО	280.67	36.85	122.18

Далее для проверки работоспособности предложенных алгоритмов был использован цифровая батиметрическая карта залива Монтерей [7]. На рис. 4 приведены траектории движения группы из трех АНПА, сформированные при ее обследовании.

Полученные результаты подтверждают работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов планирования заданий для группы АНПА и формирования траекторий типа меандр с переменным шагом. С точки зрения группового взаимодействия, предложенный подход на основе разбиения миссии на задания позволяет обрабатывать исключительные ситуации и оптимизировать работу в целом, включая ситуации, когда изменяется количество работающих АНПА. В дальнейшем предполагается повысить эффективность разработанных алгоритмов за счет формирования в процессе съемки более точного прогноза времени выполнения заданий и использование данной информации при выполнении перепланирования.

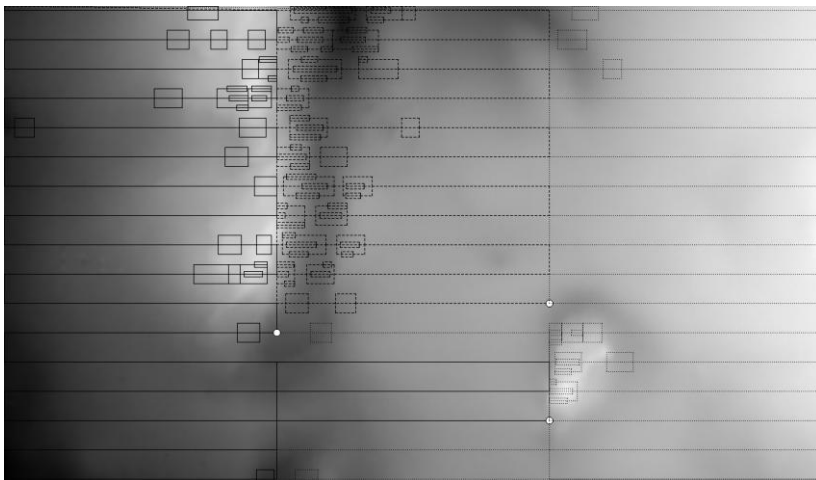


Рис. 4. Траектории движения группы из трех АНПА, сформированные при съемке поля глубин на основе цифровой батиметрической карты залива Монтерей

Литература

1. ДЮБРУЛ О. *Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных* [пер. с англ. Е. В. Ковалевский, ред. перевода Г. Н. Гогоненков]. – European Association of Geoscientists & Engineers; EAGE Publications, 2002. – 296 с.
2. ТУФАНОВ И. Е., ЩЕРБАТЮК А. Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // *Управление большими системами*. – 2012. – Выпуск 36. – С. 262–284.
3. APPLGATE D. L. *The Traveling Salesman Problem* / APPLGATE D. L., BIXBY R. E., CHVÁTAL V., COOK W. J. –Princeton University Press, 2006. – 593 p.
4. BRAGA J., CALADO P., SUJIT P. B., SOUSA J. B. *Fault Tolerant Area Coverage Using Underwater Vehicles* // IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV 2012), April 10–12, 2012, Porto, Portugal.

5. CAITI A., CASALINO G., MUNAFÒ A., TURETTA A. *Cooperating AUV Teams: Adaptive Area Coverage With Space-Varying Communication Constraints* // Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, May 11–14, 2009, Bremen, Germany.
6. CAITI A., MUNAFÒ A., VIVIANI R. *Adaptive on-line planning of environmental sampling missions with a team of cooperating autonomous underwater vehicles* // International Journal of Control. – 2007. – Vol. 80, No. 7. – P. 1151–1158.
7. CARIGNAN K. S., TAYLOR L. A., EAKINS B. W., WARNKEN R. R., SAZONOVA T., and SCHOOLCRAFT D. C. *Digital Elevation Model of Monterey, California: Procedures, Data Sources and Analysis* / NOAA, 2009. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/dem/squareCellGrid/getReport/414> (дата обращения: 12.02.2013).
8. JUNG Y. S., LEE K. W., LEE B. H. *Advances in Sea Coverage Methods Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)* // Recent Advances in Multi Robot Systems. – I-Tech Education and Publishing, 2008. – P. 69–100.
9. LOW K. H., DOLAN J. M., KHOSLA P. *Adaptive Multi-Robot Wide-Area Exploration and Mapping* // Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems, May 12–16, 2008, Estoril, Portugal. – Vol. 1. – P. 23–30.
10. PFINGSTHORN M., BIRK A., VASKEVICIUS N., PATHAK K. *Cooperative 3D Mapping Under Underwater Communication Constraints* // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, September 19–22, 2011, Kona, USA.
11. RAHIMI M., PON R., KAISER W. J., SUKHTAME G. S., ESTRIN D., SRIVASTAVA M. *Adaptive Sampling for Environmental Robotics* // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2004. – Vol. 4. – P. 3537–3544.
12. TUPHANOV I. E., SCHERBATYUK A. Ph. *Adaptive Algorithm of AUV Meander Pattern Trajectory Planning for Underwater Sampling* // ISOPE PACOMS, October 3–5, 2012, Vladivostok, Russia.

13. YILMAZ N. K., EVANGELINOS C., LERMUSIAUX P. F. J., PATRIKALAKIS N. M. *Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles for Adaptive Sampling Using Mixed Integer Linear Programming* // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2008. – Vol. 33, No. 4. – P. 522–537.
14. ZHANG B., SUKHTAME G. *Adaptive Sampling for Estimating a Scalar Field using a Robotic Boat and a Sensor Network* // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10–14, 2007, Roma, Italy. – P. 3673–3680.

ON ALGORITHMS OF HIGH-PRECISION MEASUREMENT OF UNDERWATER ENVIRONMENT PARAMETERS, BASED ON AUV GROUP USAGE

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: This paper is devoted to a problem of measurement of underwater environment parameters by using a group of autonomous underwater vehicles /AUVs/. It is supposed that measurement is done for further mapping in given area. A method of group work planning for this problem is given. Replanning is considered for the case when one of AUVs has performed its plan. The results of modeling for considered algorithms are given.

Keywords: group of autonomous underwater vehicles, group behavior, planning, environment parameters measurement.