

## Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 519.87

Л.А. Мартынова, О.В. Карсаев

### МЕТОД КООРДИНАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОСНОВЕ ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ\*

*Рассматривается способ выполнения сейсморазведки морского дна, в основе которого используется командная работа группы автономных необитаемых подводных аппаратов. Для организации командной работы рассматривается мультиагентная модель автономного поведения и информационного взаимодействия аппаратов в группе. Аппараты согласованно выполняют разнородные функции, связанные с перемещением в новое положение, заглублением, прикреплением ко дну, навигационным определением своего местоположения, прослушиванием отраженного от толщи морского дна сейсмосигнала, всплытием на заданную глубину для дальнейшего перемещения. Выход из строя некоторых аппаратов влечет за собой снижение качества результатов сейсморазведки, и для компенсации снижения качества требуется соответствующая перегруппировка всех других аппаратов, остающихся в рабочем состоянии. Особенность перегруппировки заключается, с одной стороны, в сохранении координации поведения оставшихся аппаратов группы, а с другой стороны – в перераспределении разнородных функций между аппаратами. Реализация такой перегруппировки требует соответствующего информационного взаимодействия аппаратов в группе. Это взаимодействие и является основным предметом исследования в данной статье. При этом рассматриваются различные подходы к организации схемы взаимодействия: одноуровневый (peer-to-peer) и иерархический (в данном случае двухуровневый) подходы. Вторым подходом предполагается определение и переопределение агентов (аппаратов), играющих роль лидеров в подгруппах (рядах) аппаратов. Лидеры обеспечивают информационное взаимодействие как внутри подгрупп (рядов), так и между подгруппами (рядами). Выбор варианта перегруппировки аппаратов основан на минимизации снижения эффективности в случае выхода одного или нескольких аппаратов из строя. Для тестирования предложенных решений разработана математическая имитационная модель. При проведении численных экспериментов рассматривались варианты, отличающиеся различным положением вышедшего из строя одиночного аппарата в группе и различным количеством вышедших из строя аппаратов. Для различных вариантов моделировалось информационное взаимодействие аппаратов в группе. Численные эксперименты, проведенные с использованием данной модели, подтверждают эффективность предложенных решений.*

*Мультиагентная система; автономный необитаемый подводный аппарат; сейсморазведка; эффективность; математическое имитационное моделирование.*

L.A. Martynova, O.V. Karsaev

### A METHOD OF COORDINATING THE BEHAVIOR OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES GROUP ON A MULTI-AGENT BASIS IN THE CONDUCT OF THE SEISMIC SURVEY

*The paper discusses the method for performing a seismic prospecting of the seabed, the base of that is teamwork of autonomous unmanned underwater vehicle group. To organize teamwork it is considered a multiagent model of autonomous behavior and information interaction of vehicles*

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

*in the group. Vehicles consistently perform heterogeneous functions associated with moving to a new position, diving depth, attachment to the seabed, determination of current location, listening to the reflected from the seabed seismic signal, ascent to the specified depth for further movement. Failure of some vehicles leads to a decrease in the quality of seismic prospecting results and appropriate rearrangement of all other vehicles remaining in working condition is required to compensation for the decline of quality. The peculiarity of the rearrangement is, on the one hand, to maintain the coordination of the behavior of the remaining vehicles of the group, and, on the other hand, the redistribution of heterogeneous functions between vehicles. The implementation of such a rearrangement requires a corresponding interaction between vehicles in the group. This interaction is the main subject of research in the paper. At that different approaches to the organization of the interaction scheme are considered: single-level (peer-to-peer) and hierarchical (in this case two-level) approaches. The second approach involves the definition and redefinition of agents (vehicles) that play the role of leaders in subgroups (rows) vehicles. Leaders provide information interaction both within subgroups (rows) and between subgroups (rows). The choice of the rearrangement scheme is based on minimization of efficiency decrease in case of failure of one or several vehicles. A mathematical simulation model was developed for testing the proposed solutions. For the numerical experiments it is considered the options, characterized by different positions and by different quantity of failure vehicles. For the different variants a communication vehicles in the group were simulated. Numerical experiments carried out using this model confirm the effectiveness of the proposed solutions.*

*Multiagent system; autonomous unmanned underwater vehicle; seismic prospecting; efficiency; mathematical simulation.*

**Введение.** В настоящее время все шире используется групповое применение автономных необитаемых подводных аппаратов для решения сложных народно-хозяйственных задач [1–6]. Как правило, группа состоит из однородных аппаратов, выполняющих согласованно одни и те же функции, что допускает возможность перераспределения аппаратов в случае выхода аппарата из строя.

Однако на практике все чаще возникают задачи, связанные с необходимостью выполнения аппаратами разнородных равноправных функций, что требует, в свою очередь, постоянной координации действий между аппаратами, в том числе и при выходе аппаратов из строя. В том случае, если часть аппаратов группы вышла из строя (поломка, внезапное погружение, разряд батареи, критическое отклонение от заданной траектории и т.д.), замена оставшимися, в отличие от случая выполнения аппаратами однородных задач, приводит к нарушению согласованности функционирования аппаратов, выполняющих разнородные функции. Попытка уменьшить непредвиденные ситуации путем совершенствования аппарата, повышения его надежности, приводит к его удорожанию и увеличению массогабаритных характеристик, что не всегда целесообразно. Вместе с тем выход аппарата из строя приводит к снижению эффективности выполнения поставленной перед группой аппаратов задачи. В связи с этим для эффективного выполнения поставленной задачи необходимо искать пути ее повышения. Одним из таких путей является перегруппировка аппаратов внутри группы с перераспределением функций между аппаратами.

В связи с этим необходимо было искать пути организации функционирования аппаратов в группе, основанные на современных информационных технологиях. Кроме того, в случае выхода аппаратов из строя необходимо было решить задачу оптимизации перегруппировки аппаратов так, чтобы к минимуму свести потери в эффективности выполнения поставленной перед группой задачи. И, наконец, необходимо было определить порядок взаимодействия аппаратов в группе для согласованного выполнения разнородных равноправных функций, особенно в период выхода аппаратов из строя и перераспределения выполняемых функций между оставшимися аппаратами.

Примером разнородного согласованного функционирования аппаратов в группе является ведение сейсморазведки [7]. В этом случае для перегруппировки аппаратов, согласованно выполняющих разнородные функции, необходимо решить ряд задач:

- ◆ определить подход к управлению функционированием группы;
- ◆ обеспечить координацию функционирования аппаратов внутри группы, в том числе и после их перегруппировки;
- ◆ разработать механизм обмена информацией между аппаратами внутри группы;
- ◆ сформировать целевую функцию выбора работоспособного аппарата для замещения вышедшего из строя;
- ◆ разработать и реализовать алгоритм перемещения работоспособного аппарата для замены аппарата, вышедшего из строя.

Групповое использование аппаратов широко описано в литературе. Так, теоретические основы группового управления, в том числе и в условиях препятствий, приведены в [8–10]. Для функционирования группы автономных аппаратов наиболее перспективным является представление группы как мультиагентной системы, в которой каждый автономный аппарат представляет собой агента [11]. Так, в работе [12] рассматривается функционирование группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в работе [13] – организация взаимодействия космических аппаратов (КА). Описанные в указанных работах подходы нуждаются в доработке, направленной на учет ограничений, связанных с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов в морской среде:

- ◆ по точности автономной подводной навигации;
- ◆ по дальности и скорости звукоподводной связи с взаимодействующими силами;
- ◆ по энергопотреблению.

Ряд работ, посвященных групповому применению аппаратов в морской среде, рассматривает, как правило, выполнение аппаратами однородных операций, например, обследование дна [14], обследование территории [15, 16].

Поскольку материала в приведенных работах недостаточно для решения задачи перегруппировки аппаратов, выполняющих разнородные функции, с сохранением эффективного решения поставленной перед группой задачи, возникла необходимость разработки метода координации поведения группы автономных необитаемых подводных аппаратов.

**Целью работы** явилась разработка метода координации поведения группы автономных необитаемых подводных аппаратов, выполняющих согласованно разнородные действия, в случае выхода одного или нескольких аппаратов из строя. Задача состояла в сохранении всеазимутальности сейсморазведки даже в том случае, если один или несколько аппаратов вышли из строя и оказались неспособными принять участие в ведении сейсморазведки.

Разработка метода велась на примере использования группы однородных аппаратов для сейсморазведки [7, 17].

**Описание тактического эпизода. Постановка задачи.** Сейсморазведка в заданном районе осуществляется с использованием геофонов, которые прикрепляются ко дну в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно района. Вблизи донной поверхности перемещается специальный излучатель-вибратор, зондирующий донную поверхность импульсными сигналами. Каждый геофон расположен в аппарате; аппараты осуществляют прием отраженных сигналов от объектов в придонном слое.

Помещение геофона в аппарат позволяет геофону с аппаратом самостоятельно всплывать, перемещаться в заданную точку и опускаться на дно для прослушивания отраженных сигналов. Группа аппаратов имеет форму матрицы размерностью  $M \times M$ , где  $M$  – количество рядов в группе и количество аппаратов в каждом ряду.

Вид круговой траектории (циклоиды) движения излучателя представлен на рис. 1 слева. Траектория движения излучателя представляет собой окружность, описанную вокруг группы аппаратов (рис. 1 справа).

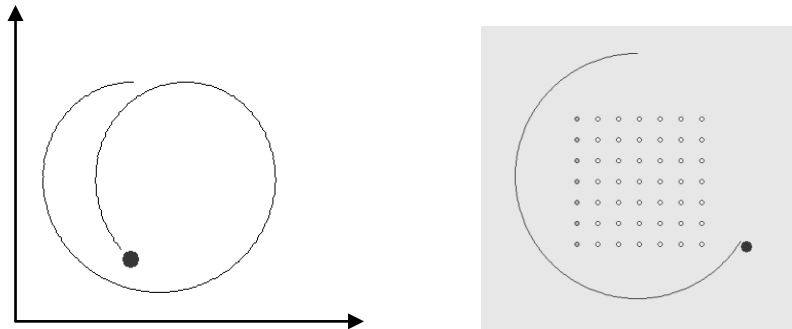


Рис. 1. Вид круговой траектории движения излучателя

Эффективность ведения сейсморазведки определяется всезаимутальностью направлений прихода отраженных сигналов [18].

Предложенный в [7, 17] метод поиска углеводородов основан на согласованном функционировании излучателя и группы аппаратов и заключается в следующем. В то время как большая часть аппаратов из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть аппаратов, расположенных в одном ряду, перемещается для занятия новой позиции, после чего участвует в приеме отраженного сигнала. Тем самым аппаратами создается антенная решетка для приема отраженного от дна сигнала. Благодаря поэтапному перемещению рядов группы происходит постоянное перемещение антенной решетки.

Предполагается, что в процессе выполнения сейсморазведки часть аппаратов может выходить из строя. Необходимо в зависимости от положения этих аппаратов в группе (в строю) организовать их замещение и перегруппировку работоспособных аппаратов таким образом, чтобы снижение эффективности ведения сейсморазведки было минимальным.

**Мультиагентный подход для согласованного выполнения аппаратами группы разнородных функций.** Для решения этой задачи в данной работе рассматривается мультиагентный подход, в соответствии с которым все аппараты в системе представляются программными агентами. Эти агенты обладают минимально необходимыми данными и знаниями и на основе информационного взаимодействия между собой автономно координируют свое поведение для решения указанной задачи.

Информационное взаимодействие между аппаратами может осуществляться на основе маячковой связи и импульсных сигналов, а также на основе модемной связи, обеспечивающей передачу информационных гидроакустических сигналов (например, [19–21]). С точки зрения организации схемы взаимодействия аппаратов принципиально важным параметром является дальность связи. Определение дальности маячковой и модемной связи в целом с точки зрения соотношения «це-

на/качество» является предметом исследований. Тем не менее, исходя из практических соображений в данной работе предварительно предполагаются следующие возможности. Дальность действия импульсного сигнала полагается, как минимум, сопоставимой с расстоянием  $M*L$ , а дальность действия модемной связи полагается сопоставимой с расстоянием  $K*L$ , где  $M$  – количество аппаратов в ряду,  $L$  – расстояние между соседними аппаратами в ряду и  $K < M$ .

Базовой составляющей данных и знаний каждого агента является минимально необходимое описание миссии (или иначе – плана выполнения сейсморазведки), которое закладывается на борт каждого аппарата до начала выполнения миссии. Это описание включает следующие данные:

- ◆ план проведения сейсморазведки в целом в виде поля точек, которые должны посетить аппараты группы;
- ◆ изначальная принадлежность аппарата определенному ряду и место в ряду, и соответственно предполагаемая последовательность точек, которые должен посетить данный аппарат;

Поведение каждого аппарата можно представлять в виде последовательности итераций, каждая из которых определяется сценарием последовательных действий для перехода в следующую точку:

- ◆ всплытие;
- ◆ перемещение;
- ◆ заглубливание;
- ◆ прикрепление ко дну;
- ◆ определение местоположения;
- ◆ прослушивание отраженного сигнала.

В процессе реализации плана сейсморазведки агент каждого АНПА итеративно определяет свое текущее состояние и план поведения на ближайший период времени, которые описываются следующим набором данных:

- ◆ текущая точка плана сейсморазведки, в которой находится или находился АНПА;
- ◆ текущее состояние:
  - a. прием отраженных сигналов,
  - b. закончил прием отраженных сигналов,
  - c. всплыл на заданную глубину для дальнейшего передвижения,
  - d. перешел в координаты следующей точки плана,
  - e. прикрепился ко дну и уточнил свои текущие координаты,
- ◆ следующая точка плана сейсморазведки, в которую должен прибыть АНПА.

Когда АНПА переходит в состояние «е», в этом описании соответствующим образом изменяется указание текущей и следующей точки. При этом следующая точка в этот момент времени рассматривается как намерение и может быть изменена на другую. Кроме того, каждый АНПА в каждый момент времени также знает свое текущее положение в группе:

- ◆ номер ряда;
- ◆ место в ряду.

Кроме своего текущего плана каждый АНПА должен иметь минимально необходимые данные, описывающие текущее оперативное состояние группы в целом, а именно – в каких точках плана сейсморазведки в текущий момент времени находятся или находились другие АНПА группы. Эти же данные одновременно являются «желтыми страницами», определяющими необходимые знания агента каждого АНПА о всех остальных АНПА для организации информационного взаи-

модействия в группе. Обновление этих данных происходит в результате информационного взаимодействия по мере того, когда АНПА очередного ряда заканчивают передвижение и переходят в состояние «е»: прикрепляются ко дну в соответствующих точках плана сейсморазведки. Знание текущего состояния группы в целом позволяет решать задачи по реализации и уточнению текущих планов поведения каждого АНПА. Такими задачами являются:

- ◆ уточнение следующей точки плана сейсморазведки, в которую должен прибыть каждый АНПА;
- ◆ уточнение каждым АНПА своего текущего положения в группе (ряд, место);
- ◆ определение времени начала передвижения АНПА в следующую точку, синхронизированное с другими АНПА своего ряда.

*Уточнение следующей точки плана сейсморазведки, в которую должен прибыть каждый АНПА.* Сопоставление текущего оперативного состояния с планом сейсморазведки позволяет выявлять точки, не занятые АНПА, и тем самым формировать необходимые исходные данные для принятия решений о перегруппировке. Результатом принятия решений о перегруппировке является уточнение следующих точек, в которые должны передвигаться АНПА соответствующего ряда.

*Уточнение своего текущего положения в группе.* Изменение текущего положения (изменение ряда и места) может происходить в двух случаях: при повороте движения группы и в результате перегруппировки в случае выхода каких-то АНПА из строя. Уточнение текущего положения очевидным образом также определяется на основе сопоставления текущего состояния группы с планом сейсморазведки, который имеется у каждого АНПА.

*Определение времени начала передвижения АНПА в следующую точку.* В случае продолжения движения группы в текущем направлении моментом времени, определяющим начало движения АНПА последнего ряда, является момент времени, когда все АНПА движущегося ряда прикрепилась ко дну и перешли в состояние «е». В случае выполнения поворота момент времени начала движения последнего ряда определяется аналогичным образом, но с учетом следующего состояния. В этом случае происходит переопределение рядов. При этом АНПА ряда, который становится последним и должен выполнить передвижение, находятся в разных состояниях: часть в состоянии «а» принимают отраженные сигналы, часть в состоянии «б» закончили прием отраженных сигналов, один в состоянии «е» прикрепился ко дну для принятия отраженных сигналов. В связи с этим в основе синхронизации начала движения ряда этих АНПА могут рассматриваться различные варианты правил. Например, движение всех АНПА начинается только после того, когда последний АНПА закончит прием отраженных сигналов и перейдет в состояние «б». Полностью противоположенный вариант: все АНПА условно переходят в состояние «б» и начинают движение.

Таким образом, целью информационного взаимодействия главным образом является поддержание в памяти всех АНПА актуальных данных, описывающих текущее оперативное состояние группы в целом. Знание агентами АНПА оперативного текущего состояния группы в целом наряду с априори известным планом сейсморазведки обеспечивают условия по реализации и возможность уточнения текущих планов каждого АНПА.

**Схема информационного взаимодействия.** Дальность распространения сигналов модемной связи, которые используются для передачи информационных сообщений, является ограниченной. Таким образом, группа АНПА с точки зрения

связи представляет собой DTN (Delay-and-Disruption Tolerant Network)-сеть. В этом случае передача сообщений между узлами сети (между АНПА) может происходить по цепочке, через промежуточные узлы (АНПА). В связи с этим могут рассматриваться два различных подхода к организации схемы информационного взаимодействия. В первом подходе все агенты являются агентами одного уровня. Такой подход называется взаимодействием агентов по схеме *p2p* (*peer-to-peer*). Во втором случае рассматривается иерархическая, в данном случае двухуровневая схема взаимодействия, в которой агенты первого уровня играют роль рядовых агентов ряда, а агенты второго уровня – роль лидера ряда.

Обновление оперативных данных о текущем состоянии группы в целом происходит всякий раз после того, когда все АНПА движущегося ряда прикрепилась ко дну и перешли в состояние «е». В части информационного взаимодействия поведение АНПА этого ряда определяется следующими правилами. До перехода в состояние «е» АНПА генерируют импульсные (маячковые) сигналы. Дальность распространения таких сигналов полагается достаточной для того, чтобы сигнал каждого АНПА ряда доходил до всех остальных АНПА ряда. Обмен такими сигналами позволяет каждому АНПА определять количество движущихся аппаратов, и тем самым определить количество АНПА ряда, выбывших из строя к этому времени. После перехода в это состояние агенты АНПА начинают информационное взаимодействие по схеме *p2p* или по двухуровневой схеме с целью обновления оперативных данных о текущем состоянии у всех АНПА группы.

В случае *p2p*-подхода каждый АНПА после перехода в состояние «е» посылает сообщение об этом всем другим АНПА группы. Например, по протоколу *Gossip*, который используется в социальных сетях. В соответствии с этим протоколом сообщение первоначально доходит до ближайших соседних АНПА, которые находятся в зоне действия модемной связи АНПА, отправителя сообщения. При получении этих сообщений каждый АНПА ретранслирует эти сообщения своим соседям, а также вносит соответствующую коррекцию в описание оперативного состояния группы в своей памяти. При повторном получении сообщений ретрансляция не выполняется. Таким образом, все сообщения доходят до всех АНПА группы, в том числе и до АНПА последнего ряда, который должен начинать передвижение. В данном сообщении каждый АНПА дополнительно указывает количество аппаратов в ряду, которое он определяет на основе обмена маячковыми сигналами. Эта информация позволяет всем АНПА других рядов определять событие, что все сообщения, влекущие обновление данных оперативного состояния группы, получены.

Двухуровневая схема взаимодействия предполагает определение лидеров рядов и обмен сообщениями между агентами ряда и между лидерами рядов. В данном варианте схема взаимодействия обобщенно может быть представлена в виде следующих фрагментов. Первоначально выполняется взаимодействие агентов АНПА движущегося ряда во время их перехода в состояние «е». Целью данного фрагмента взаимодействия является определение лидера ряда и агрегирование у него сообщений от других АНПА ряда о переходе в состояние «е». Для достижения данной цели каждый АНПА после перехода в состояние «е» посылает сообщение об этом всем другим АНПА ряда. После получения таких сообщений каждый АНПА автономно проверяет правила, на основании которых один из них принимает роль лидера ряда. Например, им становится АНПА, который находится в центральной точке, если количество АНПА в ряду нечетное. Если количество АНПА четное, лидером становится один из двух центральных АНПА, который находится ближе к левому краю ряда по ходу движения. Далее лидер этого ряда отправляет данные о текущих точках всех АНПА своего ряда лидерам других рядов. Лидеры других рядов ретранслируют эти данные АНПА своего ряда.

В результате этой схемы двухуровневого взаимодействия, как и в случае взаимодействия по схеме  $p2p$ , у всех АНПА группы полностью обновлены данные о текущем состоянии всей группы в целом. После достижения данной цели в отношении АНПА последнего ряда выполняется уточнение точек, в которые они должны двигаться. При этом можно рассматривать два варианта решения этой задачи: централизованный и автономный. Централизованный вариант предполагает, что решение в отношении каждого АНПА принимает лидер ряда и рассылает их соответствующим АНПА. Возможность автономного принятия решения каждым АНПА определяется тем, что каждый из них обладает той же самой информацией о текущем состоянии группы, что и лидер. В связи с этим можно рассматривать predetermined набор правил принятия решений по аналогии с выбором лидера ряда, на основании которых каждый АНПА может автономно уточнять (выбирать) свою точку плана сейсморазведки, в которую он должен перемещаться.

В качестве сравнительного анализа рассмотренных схем взаимодействия можно отметить следующие факторы. Схема  $p2p$  взаимодействия по протоколу *Gossip* является более простой для реализации. Она не требует решения задачи маршрутизации сообщений, но влечет генерацию относительного большого трафика сообщений: в совокупности  $n*k$  отправок (ретрансляций) сообщений, где  $n$  – количество АНПА, отправителей сообщений, а  $k$  – общее количество АНПА в группе. Схема двухуровневого взаимодействия позволяет снизить количество посылаемых и пересылаемых сообщений, но требует решения задачи маршрутизации пересылки сообщений.

Эффективные решения задачи маршрутизации в DTN-сетях, как правило, разрабатываются для конкретных примеров с учетом тех или иных специфических факторов соответствующей предметной области. В данном случае таким фактором являются те же самые данные, описывающие текущее состояние группы АНПА в целом. В частности, на основании этих данных каждый АНПА может построить граф, вершинами которого являются АНПА группы. При этом связи между парами АНПА устанавливаются на основе расчета расстояния между ними и соотнесения этого расстояния с дальностью распространения сигналов модемной связи. Для расчета расстояния используются текущие координаты точек, в которых находятся АНПА. На основании сформированного таким образом графа задачи маршрутизации могут решаться стандартным образом с помощью алгоритма Дейкстры.

**Замена вышедшего из строя аппарата другим работоспособным.** Рассмотрим функционирование группы как мультиагентной системы в случае выхода из строя части аппаратов. Замену неработоспособного аппарата наиболее целесообразно осуществлять в процессе заглубления аппаратов. В ходе перераспределения аппаратов в группе происходит переход работоспособного аппарата на место вышедшего из строя. Для целенаправленной перегруппировки определим правила, следуя которым необходимо проводить замещение аппаратов так, чтобы в результате перегруппировки обеспечить сохранение эффективного ведения сейсморазведки.

Ранее [7, 17] при рассмотрении процесса сейсморазведки было выявлено, что наиболее эффективное функционирование группы наблюдается при совпадении положения центра окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, с положением геометрического центра тяжести группы аппаратов. При выходе аппарата из строя положение центра тяжести группы смещается. Поэтому перераспределение аппаратов в группе должно быть направлено к сближению центра тяжести группы с центром окружности. Результат перегруппировки аппаратов должен способствовать:



- ◆ минимизации отклонения центра тяжести группы от центра окружности;
- ◆ минимизации угла между направлением отклонения центра тяжести группы и направлением движения центра окружности.

Минимум смещения центра тяжести группы наблюдается при отсутствии центральных аппаратов в группе и с увеличением расстояния отсутствующих аппаратов от центра группы – возрастает.

Поэтому при выборе аппарата для замены отсутствующего необходимо руководствоваться следующими правилами:

- ◆ крайние в группе аппараты замещать центральными;
- ◆ если аппарат расположен на оси симметрии вдоль направления движения группы, то его заменять не надо;
- ◆ при выборе аппарата для замены стремиться к сохранению симметрии положения аппаратов в группе относительно оси, совпадающей с направлением движения группы;
- ◆ смещение центра тяжести группы целесообразно направить в сторону движения центра окружности;
- ◆ его отсутствие в последующем не усугубило ситуацию;
- ◆ дальнейший процесс замещения не требовал бы цепной реакции замещения в том смысле, что используемый для замещения аппарат потребовалось бы на следующем этапе замещать другим.
- ◆ замену производить аппаратами из перемещающегося ряда.

Критерием выбора аппарата для замещения вышедшего из строя является:

- ◆ минимизация расстояния между центром тяжести группы и центром окружности;
- ◆ минимизация отклонения направления смещения центра тяжести относительно направления движения центра окружности.

Лидер владеет информацией о вышедших из строя аппаратах в группе и имеет возможность определить, какому именно аппарату в ряду необходимо переместиться для замещения. Выбор аппарата, предназначенного для замещения, осуществляется из аппаратов движущегося ряда. У аппарата-лидера в перемещающемся ряду на борту происходит оценка изменения положения центра тяжести группы, и на основании оценки осуществляется выбор работоспособного аппарата для замещения аппарата, вышедшего из строя. После выбора аппарата для замещения лидер ряда даст команду на опускание аппарата с указанием места, куда именно опускаться.

**Показатель эффективности и математическая модель.** Для проведения сравнительной оценки различных вариантов замещения был использован показатель эффективности сейсморазведки, который заключается в следующем [7, 17].

Эффективность ведения сейсморазведки во многом определяется всезаимутальностью прихода отраженных от толщи морского дна сигналов. Для проверки гипотезы о всезаимутальности (соответствии распределения направлений принятых сигналов равномерному) используется критерий согласия Пирсона  $\chi^2$ . Статистика критерия вычислялась согласно выражению:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Az_i - Az_{MO})^2}{Az_{MO}}, \quad (1)$$

где  $Az_i$  – количество сигналов, принятых в определенном диапазоне направлений;  $Az_{MO}$  – ожидаемое (теоретическое) количество сигналов в каждом диапазоне направлений, соответствующее равномерному распределению;  $\chi^2$  – количество диапазонов приема отраженных сигналов. На основе полученного значения статистики для распределения  $\chi^2$  с  $n-1$  степенями свободы рассчитывалась вероятность гипотезы о всезаимутальности.

Оценка степени всеазимутальности выражена отклонением полученных значений азимутов от равномерного распределения азимутов. Степень отклонения выражается среднеквадратическим отклонением (СКО) азимутов от их среднего значения.

Для расчета показателя эффективности путем проведения численных экспериментов была разработана математическая имитационная модель ведения сейсморазведки. В имитационной модели имитировалось движение излучателя и группы аппаратов. В имитационной модели в каждом такте имитации воспроизводились процессы движения излучателя по круговой траектории, движение группы аппаратов и отдельно взятых аппаратов из группы, а также излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала и прием геофонами отраженного от месторождений углеводородов сигнала. В имитационной модели реализован подход к организации взаимодействия аппаратов в группе при выполнении разнородных функций, основанный на мультиагентной технологии, реализован принцип выбора работоспособных аппаратов для замещения вышедших из строя, реализован алгоритм замещения вышедших из строя аппаратов путем перераспределения аппаратов внутри группы – с сохранением согласованного разнородного эффективного функционирования аппаратов в группе. Степень детализации воспроизводимых процессов позволяла рассматривать аппараты и излучатель как материальные точки и в то же время учитывать особенности согласованного движения группы аппаратов и излучателя.

При проведении численного эксперимента предварительно были определены оптимальные параметры: положение центра и радиус окружности, вдоль которой движется излучатель. Критерием выбора оптимальных параметров являлась минимизация СКО азимутов.

Затем при выбранных параметрах излучателя рассматривались варианты выхода из строя одиночного аппарата в группе. Результаты численных экспериментов приведены на рис. 4.

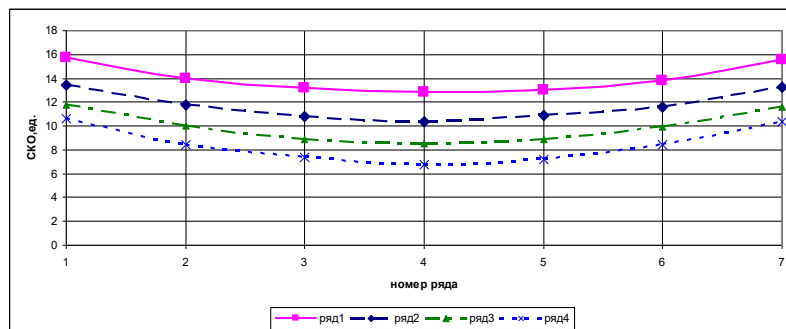


Рис. 4. Влияние места вышедшего из строя одиночного аппарата на эффективность сейсморазведки

Из рис. 4 видно, что наиболее уязвимыми являются аппараты в крайнем левом или крайнем правом месте. Центральные аппараты в группе оказывают меньшее влияние на снижение СКО.

Кроме того, были проведены исследования по влиянию количества вышедших из строя аппаратов на эффективность сейсморазведки. Результаты численных экспериментов приведены на рис. 5.

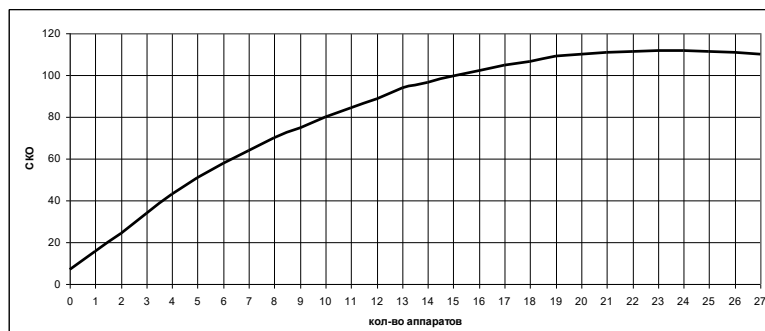


Рис. 5. Влияние количества выведенных из строя аппаратов на эффективность сейсморазведки

Результаты моделирования показали, что с увеличением количества вышедших из строя аппаратов наблюдается существенное ухудшение эффективности сейсморазведки.

Полученные результаты позволяют оценить эффективность в результате перегруппировки аппаратов. Так, для проведения сравнительной оценки влияния перегруппировки на эффективность сейсморазведки рассматривался последовательный выход из строя крайних в группе аппаратов и соответствующая замена образовавшихся пустот в группе центральными аппаратами.

Результаты исследований приведены на рис. 6: пунктирной линией обозначены результаты в отсутствии перегруппировки аппаратов, горизонтальной – результаты при использовании перегруппировки аппаратов.

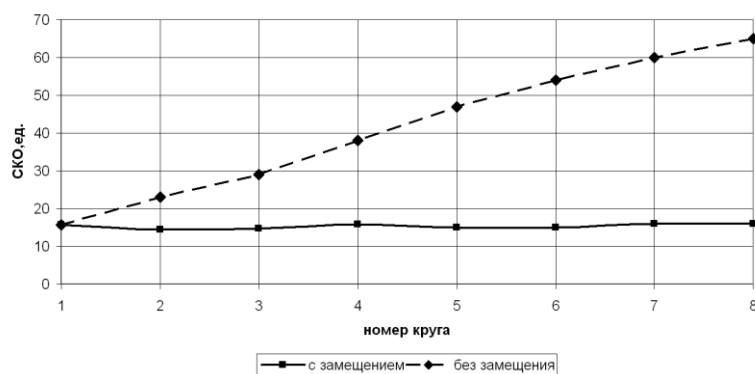


Рис. 6. Сравнительная оценка эффективности сейсморазведки

Из результатов, приведенных на рис. 6, видно, что в отсутствии перегруппировки наблюдается существенное снижение эффективности ведения сейсморазведки. Так, при выходе из строя от 1 до 8 аппаратов СКО возрастает от 15 до 65 е. соответственно. Вместе с тем использование перегруппировки аппаратов в группе позволяет сохранить эффективность сейсморазведки практически без изменения. Сказанное означает, что несмотря на то, что один или часть аппаратов оказались вышедшими из строя, на эффективности сейсморазведки это практически не отразилось за счет выполнения перегруппировки аппаратов.

**Заключение.** Для организации командной работы рассматривалась мультиагентная модель автономного поведения и информационного взаимодействия аппаратов в группе. В отличие от имеющихся аналогов группового применения аппаратов, выполняющих однородные функции, в данной работе рассматривается более сложная и принципиально новая задача – выполнения аппаратами разнородных равноправных функций. Сложность такой задачи заключается в том, что при выходе из строя аппарата необходимо не просто перегруппировать аппараты, но и перераспределить выполняемые ими функции так, чтобы поставленная перед ними задача продолжала эффективно выполняться. Задача усугубляется отсутствием центрального звена, которое способно было бы координировать выполняемые аппаратами функции. Поэтому при решении задачи восстановления эффективного функционирования группы при выходе аппарата из строя, наряду с оптимизацией перераспределения положения аппаратов был проработан вопрос эффективного взаимодействия аппаратов в группе между собой.

Это взаимодействие и явилось основным предметом исследования в данной статье. При этом рассматриваются различные подходы к организации схемы взаимодействия: одноуровневый (peer-to-peer) и иерархический (в данном случае двухуровневый) подходы. Выбор варианта перегруппировки аппаратов основан на минимизации снижения эффективности в случае выхода одного или нескольких аппаратов из строя. Для тестирования предложенных решений разработана математическая имитационная модель. При проведении численных экспериментов рассматривались варианты, отличающиеся различным положением вышедшего из строя одиночного аппарата в группе и различным количеством вышедших из строя аппаратов. Для различных вариантов моделировалось информационное взаимодействие аппаратов в группе. Численные эксперименты, проведенные с использованием данной модели, подтверждают эффективность предложенных решений. Предложенный метод перегруппировки аппаратов в группе при выполнении ими разнородных функций и выходе одного или нескольких аппаратов из строя привел к повышению эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 400 с.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2 (4). – С. 5-14.
3. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 4-13.
4. Боженков Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 4-68.
5. Millar G., Mackay L. Maneuvering under the ice // Sea technology. – 2015. – Vol. 56, No. 4. – P. 35-38.
6. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. – 304 с.
7. Мартынова Л.А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1 (86). – С. 83-92.
8. Куржанский А.Б. Задача о нестолкновениях при групповом движении в условиях препятствий // Тр. Института математики и механики РАН. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 132-147.
9. Куржанский А.Б. О задаче группового управления в условиях препятствий // Тр. Института математики и механики РАН. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 166-179.

10. Куржанский А.Б., Месяц А.И. Математические задачи группового управления: теория и вычисления // Материалы 4-ой Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СТК-2016) 19-24 сентября 2016 с. Дивноморское Геленджик. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 44-47.
11. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 64-116.
12. Будаев Д.С., Воицук Г.Ю., Гусев Н.А., Майоров И.В., Мочалкин А.Н. Разработка системы согласованного управления группой беспилотных аппаратов с применением мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10 (171). – С. 18-28.
13. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 2. – С. 3-24.
14. Машошин А.И., Скобелев П.О. Применение мультиагентных технологий к управлению группой автономных необитаемых подводных аппаратов // 11-я Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», 4-8 апреля 2016 г., Крым, Евпатория.
15. Кожемякин И.В., Никущенко Д.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н. Развитие системы автономного группового управления разнородными надводными и подводными необитаемыми аппаратами // Седьмая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана. – Владивосток, 2017. – С. 48-57.
16. Кожемякин И.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н. Мультиагентная система управления группой АНПА с несколькими лидерами // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia.
17. Мартынова Л.А. Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2 (87). – С. 77-87.
18. Buia M., Flores P.E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Houbiers M., Thompson M., Laura S., Menlikli C., Moldoveanu N., Snyder E. Shooting Seismic Surveys in Circles. – Режим доступа: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors08/aut08/shooting\\_seismic\\_surveys\\_in\\_circles.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors08/aut08/shooting_seismic_surveys_in_circles.pdf). – Загл. с экрана. Яз. англ.
19. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 3 (94). – С. 115-130.
20. Кебкал К.Г., Кебкал А.Г., Глушко Е.В., Кебкал В.К., Себастио Л., Паскуаль А., Рибейро Дж., Сильва Г. Рибейро, Индивери Дж. Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia.
21. Кебкал О., Комар М., and Кебкал К. D-MAC: Hybrid media access control for underwater acoustic sensor networks, in Proceedings of IEEE Communications Workshops (ICC) // IEEE International Conference, Cape Town, South Africa. ISBN: 978-1-4244- 6824-9, 2010.
22. Кебкал К.Г., Кебкал А.К., Кебкал О.Г., and Bannasch R. Modelling and validation of basic characteristics in underwater acoustic sweep-spread-carrier communications // in Underwater Technology 2015 IEEE, 23–25 Feb. 2015. Doi 10.1109/UT.2015.7108312.
23. Кебкал К. and Bannasch R. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation // Journal of Acoustic Society of America. – 2002. – Vol. 112 (5). – P. 2043-2052.
24. Кебкал О.Г., Кебкал К.Г., and Комар М. Development of upper-layer protocols with S2CR acoustic modems emulator // in Proc. Conf. on Underwater Communications: Channel Modeling and Validation, UCOMMS, 12–14 September 2012, Sestri Levante, Italy.
25. Кебкал К., Кебкал О., and Глушко Е. Propagation time estimation between underwater acoustic modems during data exchange via synchronous instant messages // in Proceedings of the OCEANS 2014 MTS/IEEE Conference and Exhibition, IEEE, Taipei, Taiwan.
26. Кебкал К.Г., Кебкал А.Г., Кебкал В.К., and Petroccia R. Synchronization tools of acoustic communication devices in control of underwater sensors // distributed antennas, and autonomous underwater vehicles, Gyroscopy and Navigation. – 2014. – Vol. 5 (4). – P. 257-265.

27. Белов Б.П., Коротыцкий Е.В., Семенов Н.Н., Сетин А.И. Информационное обеспечение роботов для выполнения различных миссий // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Ageev M.D. *i dr.* Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow: Nauka, 2005, 400 p.
2. Inzartsev A.V. *i dr.* Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike [Application of an Autonomous unmanned underwater vehicle for scientific research in the Arctic], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2007, No. 2 (4), pp. 5-14.
3. Gizitdinova M.R., Kuz'mitskiy M.A. Mobil'nye podvodnye roboty v sovremennoy okeanografii i gidrofizike [Mobile underwater robots in modern Oceanography and Hydrophysics], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 4-13.
4. Bozhenov Yu.A. Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki [The use of Autonomous unmanned underwater vehicles for Arctic and Antarctic research], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 4-68.
5. Millar G., Mackay L. Maneuvering under the ice, *Sea technology*, 2015, Vol. 56, No. 4, pp. 35-38.
6. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP "Khabarovskaya kraevaya tipografiya", 2011, 304 p.
7. Martynova L.A. Metod soglasovannogo povedeniya izluchatelya i avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya effektivnogo vedeniya seysmorazvedki [The method consistent behavior of the emitter and Autonomous unmanned underwater vehicles for the efficient conduct of seismic data], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, No. 1 (86), pp. 83-92.
8. Kurzhanskiy A.B. Zadacha o nestolknovennykh pri gruppovom dvizhenii v usloviyakh prepyatstviy [The problem of netaknute for group movement in terms of obstacles], *Tr. Instituta matematiki i mekhaniki RAN* [Proceedings of Institute of mathematics and mechanics Russian Academy of Sciences], 2015, Vol. 21, No. 2, pp. 132-147.
9. Kurzhanskiy A.B. O zadache gruppovogo upravleniya v usloviyakh prepyatstviy [The task of group management in terms of obstacles], *Tr. Instituta matematiki i mekhaniki RAN* [Proceedings of Institute of mathematics and mechanics Russian Academy of Sciences], 2014, Vol. 20, No. 3, pp. 166-179.
10. Kurzhanskiy A.B., Mesyats A.I. Matematicheskie zadachi gruppovogo upravleniya: teoriya i vychisleniya [Mathematical problems of group management: theory and computation], *Materialy 4-oy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii (STK-2016) 19-24 sentyabrya 2016 s. Divnomorskoe Gelendzhik* [Proceedings of 4-th all-Russian scientific-technical conference "Supercomputer technologies (STK-2016) September 19-24, 2016 p. Divnomorskoe, Gelendzhik]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 44-47.
11. Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V. Mnogoagentnye sistemy (obzor) [Multi-agent systems (review)], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial intelligence news], 1998, No. 2, pp. 64-116.
12. Budaev D.S., Voshchuk G.Yu., Gusev N.A., Mayorov I.V., Mochalkin A.N. Razrabotka sistemy soglasovannogo upravleniya gruppoy bespilotnykh apparatov s primeneniem mul'tiagentnykh tekhnologiy [Development of a system of coordinated control of group of unmanned vehicles applying multi-agent technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskoe nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 18-28.
13. Gorodetskiy V.I., Karsaev O.V., Samoylov V.V., Serebryakov S.V. Prikladnye mnogoagentnye sistemy gruppovogo upravleniya [Applied multi-agent group control systems], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2009, No. 2, pp. 3-24.

14. Mashoshin A.I., Skobelev P.O. Primenenie mul'tiagentnykh tekhnologiy k upravleniyu gruppy avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Application of multi-agent technologies to the management of a group of Autonomous unmanned underwater vehicles], *11-ya Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya», 4-8 aprelya 2016 g., Krym, Evpatoriya* [11th all-Russian scientific and practical conference "Perspective systems and control tasks", April 4-8, 2016, Crimea, Evpatoria.].
15. Kozhemyakin I.V., Nikushchenko D.V., Ryzhov V.A., Semenov N.N., Chemodanov M.N. Razvitiye sistemy avtonomnogo gruppovogo upravleniya raznorodnymi nadvodnymi i podvodnymi neobitaemyimi apparatami [Development of the system of Autonomous group control of dissimilar surface and underwater uninhabited vehicles], *Sed'maya vs Rossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana* [Seventh all-Russian scientific and technical conference "Technical problems of development of the world ocean]. Vladivostok, 2017, pp. 48-57.
16. Kozhemyakin I.V., Ryzhov V.A., Semenov N.N., Chemodanov M.N. Mul'tiagentnaya sistema upravleniya gruppy ANPA s neskol'kimi liderami [Multi-agent control system for the group of ANPA with several leaders], *International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia*.
17. Martynova L.A. Instrumentariy dlya issledovaniy effektivnosti vedeniya seysmorazvedki s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Tools for studies on the effectiveness of conducting seismic surveys using Autonomous underwater vehicles], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, No. 2 (87), pp. 77-87.
18. Buia M., Flores P.E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Houbiers M., Thompson M., Laura S., Menlikli C., Moldoveanu N., Snyder E. Shooting Seismic Surveys in Circles. [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors08/aut08/shooting\\_seismic\\_survey\\_s\\_in\\_circles.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors08/aut08/shooting_seismic_survey_s_in_circles.pdf).
19. Kebkal K.G., Mashoshin A.I. Gidroakusticheskie metody pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydro-acoustic methods of positioning Autonomous unmanned underwater vehicles], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2016, Vol. 24, No. 3 (94), pp. 115-130.
20. Kebkal K.G., Kebkal A.G., Glushko E.V., Kebkal V.K., Sebastio L., Paskual' A., Ribeyro Dzh., Sil'va G. Ribeyro, Indiveri Dzh. Gidroakusticheskie modemy s integrirovannymi tsezievymi chasami dlya zadach podvodnogo pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydroacoustic modems with integrated cesium clocks for underwater positioning of Autonomous unmanned underwater vehicles], *International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia*.
21. Kebkal O., Komar M., and Kebkal K. D-MAC: Hybrid media access control for underwater acoustic sensor networks, in *Proceedings of IEEE Communications Workshops (ICC), IEEE International Conference, Cape Town, South Africa*. ISBN: 978-1-4244- 6824-9, 2010.
22. Kebkal K.G., Kebkal A.K., Kebkal O.G., and Bannasch R. Modelling and validation of basic characteristics in underwater acoustic sweep-spread-carrier communications, in *Underwater Technology 2015 IEEE, 23–25 Feb. 2015*. Doi 10.1109/UT.2015.7108312.
23. Kebkal K. and Bannasch R. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation, *Journal of Acoustic Society of America*, 2002, Vol. 112 (5), pp. 2043-2052.
24. Kebkal O.G., Kebkal K.G., and Komar M. Development of upper-layer protocols with S2CR acoustic modems emulator, in *Proc. Conf. on Underwater Communications: Channel Modeling and Validation, UCOMMS, 12–14 September 2012, Sestri Levante, Italy*.
25. Kebkal K., Kebkal O., and Glushko E. Propagation time estimation between underwater acoustic modems during data exchange via synchronous instant messages, in *Proceedings of the OCEANS 2014 MTS/IEEE Conference and Exhibition, IEEE, Taipei, Taiwan*.
26. Kebkal K.G., Kebkal A.G., Kebkal V.K., and Petroccia R. Synchronization tools of acoustic communication devices in control of underwater sensors, *Distributed antennas, and autonomous underwater vehicles, Gyroscopy and Navigation*, 2014, Vol. 5 (4), pp. 257-265.

27. *Belov B.P., Korotitskiy E.V., Semenov N.N., Setin A.I. Informationsionnoe obespechenie robotov dlya vypolneniya razlichnykh missiy [Information support of robots for various missions], International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.С. Малышкин.

**Мартынова Любовь Александровна** – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: +79219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

**Карсаев Олег Владиславович** – СПИИРАН; e-mail: karsaev@ips-logistic.com; 199178, Санкт-Петербург, В.О., 14 линия, 39; тел.: +79119095270; к.т.н.; с.н.с.

**Martynova Liubov Alexandrovna** – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Saint-Petersburg, Malaja Posadskaja street, 30; phone:+79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

**Karsaev Oleg Vladislavovich** – SPIIRAS; e-mail: karsaev@ips-logistic.com; 199178, V.O., 14 liniya, 39; phone: +79119095270; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 681.5+008.8

**А.Г. Курочкин, А.В. Гривачев, В.В. Варганов, Е.А. Титенко**

#### **АППАРАТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО ПОДВИЖНОГО РОБОТА**

*Цель исследования состоит в повышении эффективности планирования маршрута для наземного подвижного робота. Повышение эффективности достигается за счет получения на матрице местности дополнительной информации. Эта информация имеет глобальный характер. Она формируется на основе аппаратно реализуемых логических операций конъюнкции или дизъюнкции. Статусы проходимости ячеек матрицы являются входными данными для данных логических операций, которые могут вычисляться параллельно. В работе рассмотрены ограничения классического метода и алгоритма А-звездочка. Согласно методу, местность описывается как матрица с проходимыми или непроходимыми ячейками. Показано, что бинарное описание препятствий не всегда является достаточным для рационального планирования маршрута. Для расширения возможностей подвижного робота статус проходимости ячейки описывается многозначным образом: непроходимая ячейка, свободная ячейка матрицы, частично проходимая ячейка. Такая модификация позволяет при наличии коридора или прохода в протяженном объекте-препятствии строить более короткий по длине маршрут. Следующей задачей исследования является модификация алгоритма А-звездочка. Сущность модификации состоит в использовании объективной дополнительной информации об особенностях исходной матрицы ячеек. Эта информация представляется двоичными флагами. Они обозначают свободные от препятствий строки и столбцы матрицы. Модификация позволяет строить маршруты, включающие прямолинейные участки из свободных ячеек. Главная особенность данного метода заключается в использовании побитовых логических операций над значениями ячеек. Дополнительная информация имеет глобальный характер, она применима независимо от исходной позиции подвижного робота, целевой позиции, процента непроходимых ячеек в матрице. Моделирование фигур препятствий (спираль, коши, лестница) на наиболее трудных для планирования маршрутах показало, что использование двоичных флагов свободных строк или столбцов позволяет строить прямолинейные маршруты и двигаться по ним с максимальной скоростью. Также научная новизна модифицированного метода планирования маршрута определяется возможностью выходить из тупиковой ячейки по ранее проложенной траектории. Эта особенность позволяет сократить время планирования маршрута.*

*Подвижный робот; планирование маршрута; эвристика; логические операции; матрица ячеек; препятствия.*