

А.М. МАЕВСКИЙ, В.А. РЫЖОВ, Т.А. ФЕДОРОВА, И.А. ПЕЧАЙКО,
Н.М. БУРОВ

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ, ОСНОВАННАЯ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ЛУВЕНСКОМ АЛГОРИТМЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Маевский А.М., Рыжов В.А., Федорова Т.А., Печайко И.А., Буров Н.М. Стохастическая динамическая модель подводной беспроводной сенсорной сети, основанная на модифицированном лувенском алгоритме кластеризации.

Аннотация. В данной работе представлен инновационный подход к кластеризации и маршрутизации в подводных беспроводных сенсорных сетях (ПБСС), основанный на модифицированном Лувенском алгоритме учитывающим расстояния между узлами, вероятности успешной передачи сообщений и текущий уровень энергии сенсоров. Класс задач, для которых используется указанный подход – гибридные подводные акустические беспроводные сенсорные сети с мобильным (надводным или подводным) шлюзом. Предложенный метод реализует механизм динамической рекластеризации сети на основе мониторинга энергетических ресурсов узлов, что позволяет перераспределять роли сенсоров в сети (обыкновенных и референсных) и обеспечивать адаптацию сети к изменениям внешней среды и состоянию сенсоров. Разработанный алгоритм нацелен на повышение энергоэффективности, минимизацию потерь данных и сокращение числа ретрансляций при передаче сообщений в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустического канала связи. MAC-уровень базируется на TDMA протоколе, исключая возможность коллизий за счёт использования независимых временных слотов для сенсоров. Динамическая модель решает ключевые задачи управления ресурсами ПБСС: снижает энергозатраты, повышает надёжность передачи данных, уменьшает длительность передачи сообщений и продлевает срок автономной работы сети. Модель учитывает пространственную трёхмерную структуру размещения сенсоров и оптимизирует размещение референсных узлов, предотвращая перегрузку и появление «узких мест» в сети. Целью работы является построение топологии, минимизирующей энергопотребление и потери сообщений при эффективной маршрутизации данных к мобильному шлюзу. Гибкость и адаптивность предложенного подхода делает его применимым в реальных подводных задачах мониторинга окружающей среды и исследованиях мирового океана. Модифицированный Лувенский алгоритм с введенным порогом кластеризации оказался эффективным инструментом, обеспечивающим детальный анализ влияния проектных параметров на основные функциональные характеристики ПБСС. Сочетание модифицированного Лувенского алгоритма и модифицированного метода Дейкстры в рамках предложенной имитационной стохастической модели позволяет создавать устойчивую, адаптивную и энергоэффективную кластерную архитектуру сети.

Ключевые слова: подводные беспроводные акустические сенсорные сети, алгоритмы кластеризации, алгоритмы маршрутизации, Лувенский алгоритм, модифицированный алгоритм Дейкстры, TDMA протокол, энергоэффективность и надежность подводной беспроводной акустической сенсорной сети.

1. Введение. В данной работе предложен инновационный подход к кластеризации и маршрутизации для ПБСС, который

использует модифицированный Лувенский алгоритм. Оригинальность предлагаемого метода заключается в том, что он учитывает как расстояние между сенсорами, и, как следствие, вероятность успешной доставки сообщения, так и текущий уровень их энергии. Такой подход позволяет адаптировать топологию сети в реальном времени в зависимости от изменений в подводной среде и энергетического баланса узлов и проводить динамическую рекластеризацию сети. Это обеспечивает равномерное распределение нагрузки между сенсорами, что в свою очередь увеличивает срок автономной работы сети и снижает вероятность перегрузки отдельных узлов. Основная цель разработанного алгоритма – обеспечить энергоэффективность сети, минимизировать потери данных и количество ретрансляций в условиях ограниченной пропускной способности гидроакустических каналов связи и энергетического ресурса батарей сенсоров.

Главным новшеством является механизм динамической рекластеризации, основанный на мониторинге уровня энергии сенсоров. При снижении энергетических ресурсов узлов их роли перераспределяются, что минимизирует число ретрансляций и поддерживает высокую эффективность сети. Также в подходе реализован MAC протокол на основе TDMA, который исключает коллизии, так как предписывает сенсорам работать в независимых временных слотах, исключая взаимные помехи в гидроакустических каналах связи.

Представленный метод маршрутизации решает несколько ключевых проблем управления ресурсами в ПБСС. Во-первых, благодаря учёту вероятности успешной передачи данных и оптимизации маршрутов, снижается количество потерянных сообщений. Во-вторых, энергопотребление сети уменьшается за счёт балансировки нагрузки и рационального использования узлов-ретрансляторов. Одновременная передача сообщений сенсоров из разных кластеров в одних и тех же временных слотах сокращает общую продолжительность передачи сообщений. Наконец, динамическая рекластеризация обеспечивает надёжность сети, увеличивает её устойчивость к отказам и продлевает срок автономной работы, что делает метод применимым для реальных подводных задач, таких как мониторинг экосистем или разведка ресурсов.

Подводная сеть сенсоров рассматривается как пространственная 3D структура, где сенсоры размещены в толще воды на различных глубинах с шагом развертывания, значительно меньшим размеров области акватории. Сенсоры передают собранные данные о состоянии окружающей среды через центральные референсные узлы в каждом

кластере на мобильный шлюз. Передача данных на референсный узел осуществляется либо напрямую, либо через последовательность ретрансляционных узлов.

Важной задачей при оптимизации работы ПБСС является задача кластеризации. Разбиение сенсорной сети на кластеры определяется прежде всего оптимальным расположением референсных узлов, так как именно к ним стекается вся информация от обыкновенных узлов сети. Очевидно, что пропускная способность референсного узла ограничена и при большой размерности сети и неудачном расположении возможно появление «узких мест», в которых резко возрастают энергозатраты, приводящие к быстрой разрядке аккумуляторов. Очевидно, кластеризация будет зависеть от топологии самой сети.

Общую задачу маршрутизации, которая будет решаться ниже, можно сформулировать следующим образом – нахождение такого разбиения множества сенсоров на кластеры и поиск в кластерах оптимальных маршрутов доставки сообщений, при котором:

- Минимизируются энергетические затраты на передачу сообщений внутри каждого кластера;
- Максимизируется вероятность успешной передачи данных к референсным узлам;
- Балансируется нагрузка на сенсоры, чтобы предотвратить преждевременную потерю энергии отдельными узлами.

Основная цель – это оптимизация топологии сети, т.е. формирование такой структуры сети, которая минимизирует затраты энергии и потери сообщений при эффективной маршрутизации с уменьшением числа ретрансляций и оптимизации маршрутов для передачи данных к референсным узлам и далее к мобильному шлюзу.

В модели заложена возможность динамической адаптации: при изменении энергетического состояния или топологии (например, из-за перемещения сенсоров или изменения условий среды) проводится перераспределение ролей (основных и референсных узлов) и пересмотр кластерной структуры. Этот формализм обеспечивает основу для разработки подхода к кластеризации и маршрутизации, ориентированного на энергоэффективность и надёжность работы сети в условиях динамической подводной среды.

2. Обзор литературы. Проектирование эффективных и надежных ПБСС предполагает решение проблем, связанных с серьезными особенностями подводного акустического канала, определяемыми его динамическими свойствами – большой задержкой распространения сигнала, ограниченной полосой пропускания, низкой

скоростью передачи данных, высокой вероятностью битовых ошибок [1, 2]. К тому же, если принять во внимание то, что ПБСС потребляют гораздо больше энергии, чем наземные сенсорные сети [3], а технические компоненты ПБСС имеют ограниченные энергоресурсы, пополнение которых проблематично [4], то управление энергопотреблением в ПБСС, определяющее эксплуатационную жизнь сети, является большой проблемой.

Помимо указанного, нужно учитывать, что различные практические приложения, такие как сбор океанографических данных, мониторинг загрязнений, морская разведка, навигационная безопасность, распределенное тактическое наблюдение [5, 6], накладывают свои специфические ограничения и требования на архитектуру и проектные параметры разрабатываемых ПБСС.

Одной из главных целей проектирования эффективной ПБСС, независимо от сценариев приложений, является достижение высокого коэффициента доставки пакетов при ограничении сквозной задержки и энергопотребления компонентов сети [7], т.е. обеспечение высокой надежности сети.

Очевидно, что проектирование ПБСС, отвечающей критериям надежности и энергоэффективности, является комплексной и достаточно сложной проблемой. Рассматриваемая оптимизационная задача является многопараметрической и многокритериальной, требует всестороннего анализа влияния на основные функциональные характеристики ПБСС совокупности параметров различной природы: как технических, так и физических.

Подобному анализу посвящено большое количество исследований, связанных с разработкой энергоэффективных и надежных ПБСС.

Энергоэффективность определяет время жизни сети (при ограниченной емкости батарей узлов-сенсоров). В процессе эксплуатации в сети могут появляться энергетические дыры/пустые области, связанные с прекращением работы некоторых узлов и приводящие к снижению производительности сети. Причинами появления пустых областей являются: выход из строя узлов из-за ограниченного срока службы источников питания; проблемы, обусловленные повреждением сенсоров; разреженная топология сети; изменчивая характеристика гидроакустического канала; воздействие технических объектов и морских животных. При выходе из строя некоторого числа узлов сеть теряет работоспособность полностью или частично (могут оказаться недоступны группы узлов, маршруты доставки сообщений от которых проходили через вышедшие из строя

узлы). Энергоэффективность сети зависит от большого числа физических и технических параметров, связанных со средой функционирования, топологией сети, техническими параметрами приемо-передающих устройств. Корректный учет/выбор этих параметров позволяет снизить негативный эффект от появления «пустых областей» в сети [8 – 11].

Существует большое количество работ, посвященных улучшению энергоэффективности ПБСС. Эти работы были связаны с исследованиями по следующим направлениям:

- улучшением технических параметров источников энергии [12 – 16],
- контролем / управлением топологией сети [17 – 19];
- использованием мобильных узлов/шлюзов [17, 19 – 21];
- разработкой энергоэффективных протоколов маршрутизации [22 – 28];
- разработкой эффективных протоколов доступа к среде (MAC-протоколов) [29 – 32];
- модернизацией протоколов физического уровня (методов формирования и обработки сигнала) / улучшением технических параметров модемов [33 – 35].

Надежность сети определяется коэффициентом доставки пакетов (Packet Delivery Ratio – PDR) / коэффициентом потери пакетов (Packet Loss Ratio – PLR), а также сквозной задержкой передачи пакета. Указанные характеристики определяют качество обслуживания с точки зрения пользователя конкретного приложения.

Вероятность доставки пакетов определяется отношением количества пакетов, успешно достигших шлюза, к количеству пакетов, переданных узлом-источником. Сквозная задержка доставки пакета определяется средней задержкой передачи между узлом-источником и узлом-приемником (шлюзом).

Вероятность доставки пакетов связана с топологией сети – количеством сенсорных узлов и плотностью их распределения в акватории, с используемым протоколом маршрутизации, с нагрузкой сети, с использованием в составе сети мобильных шлюзов, коэффициентом затухания сигнала, мощностью излучателя, чувствительностью приемника, окружающими шумами.

В исследованиях показано [36], что значение PDR увеличивается по мере увеличения плотности узлов сети для большинства протоколов маршрутизации. Это связано с тем, что чем больше количество узлов в сети, тем выше вероятность корректного выбора следующего узла пересылки. Таким образом, снижается

вероятность потери пакетов из-за недоступности узла в пределах зоны пересылки. При этом средняя сквозная задержка доставки пакета уменьшается.

Эффективные алгоритмы протоколов маршрутизации разрабатываются таким образом, чтобы обеспечить лучшее значение PDR при ограничении на энергопотребление и сквозную задержку [36].

Задача обеспечения высоких значений PDR для эффективного протокола маршрутизации, связана с решением проблемы уменьшения негативного влияния энергетических дыр/пустых областей. Результаты исследований влияния на PDR различного количества пустых областей в акватории с фиксированным числом узлов показывают, что с увеличением плотности узлов в акватории при одинаковом количестве пустых областей для эффективных протоколов маршрутизации PDR возрастает. PDR также связан с нагрузкой сети. Как правило, с увеличением нагрузки сети (количеством пересылаемых пакетов в единицу времени) возрастает количество потерянных пакетов, что приводит к снижению PDR. Поэтому разрабатываемые протоколы маршрутизации нацелены на улучшение производительности, связанной с увеличением пропускной способности сети и уменьшением длительных сквозных задержек.

Задачей, решение которой влияет и на эффективность, и на надёжность функционирования ПБСС является управление топологией сети.

Контроль / управление топологией сети с помощью моделей кластеризации [37] является одним из важных инструментов, позволяющим сбалансировать энергопотребление, продлить срок службы сети и повысить надёжность. При этом модель кластеризации должна быть динамической и учитывать текущее состояние системы (как энергетическое, так и связанное с изменением внешней среды). Ранее разрабатывались модели, поддерживающие процессы на отдельных уровнях, например, протоколы для транспортного или сетевого уровней [38]. Они не использовали информацию, имеющуюся на других уровнях, например, на физическом, и совместной оптимизации решения не проводилось. Поэтому общая производительность моделируемых сетей была относительно невысокой [40 – 42]. Перспективным является развитие моделей/протоколов, использующие кроссуровневую структуру [39, 43], которая позволяет эффективно использовать данные, полученные на разных уровнях системной модели OSI.

Перечисленные факты, связанные с задачами повышения энергоэффективности и надежности сети, определяют направления исследований по разработке моделей/протоколов/алгоритмов функционирования ПБСС.

Основываясь на выполненном анализе существующих исследований, в рамках настоящей работы авторы предлагают новую имитационную стохастическую динамическую кроссуровневую модель ПБСС, использующую на сетевом и MAC уровнях – модифицированный Лувенский алгоритм, алгоритм Дейкстры, TDMA протокол, и обеспечивающую построение оптимальной топологии, минимизирующей энергопотребление и потери сообщений при маршрутизации данных к мобильному шлюзу.

3. Моделирование сложных динамических сетей. Рассмотрим общие свойства и универсальные закономерности, характерные для всех сетей, несмотря на их разнообразие. Сети можно определить как мультиагентные системы, состоящие из определённого числа узлов, соединённых между собой связями (рёбрами). Архитектура сети определяется её топологией – способом соединения узлов. Подводная беспроводная сенсорная сеть включает множество из N сенсоров $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ где каждый сенсор b_i характеризуется определенным набором параметров.

Особенностью сетей является их сложность. Сложные сети могут включать множество узлов, с разным количеством связей между ними, и эти связи могут изменяться со временем. Такое поведение сетей делает их изучение важным для понимания структурных и динамических свойств, таких как появление, исчезновение узлов или изменение связей. Примеры таких сетей включают биологические, социальные и технические системы.

Традиционная задача изучения сложных сетей (мультиагентных систем) заключается в анализе их структуры и описании основных характеристик. Однако, простого понимания структуры недостаточно. Для изучения сложных сетей необходимо учитывать их динамическую природу, так как изменения в связях и узлах определяют функциональность и поведение сети в целом.

Важен переход к более высокому уровню анализа сетей, где учитываются динамические процессы, происходящие в узлах и связях. Для таких систем определение только структурных свойств недостаточно. Необходимо учитывать состояние сети – значения динамических переменных, описывающих поведение узлов и связей. Основной задачей становится изучение динамики сети, то есть изменений, происходящих во времени в узлах и связях. Если

изменения состояния сети происходят значительно быстрее, чем изменения её топологии, то можно считать топологию статической (фиксированной во времени) и анализировать влияние структурных и динамических параметров на активность сети. Однако в более сложных случаях, когда узлы и связи изменяются в течение времени, требуется учитывать их эволюцию.

В полной мере все сказанное относится и к подводным беспроводным сенсорным сетям, представляющим собой яркий пример динамически изменяющихся мультиагентных систем.

В теории сложных сетей основными объектами изучения являются ансамбли, состоящие из конечного числа N узлов (вершин), которые соединены между собой связями (рёбрами). Топология связей задаётся квадратной матрицей смежности (или матрицей связей), обозначаемой как $A = \{a_{ij}\}, i, j = 1, \dots, N$. Элементы этой матрицы указывают на существование связи между узлами i и j и принимают значения:

$a_{ij} = 1$ означает, что между узлами i и j существует связь;

$a_{ij} = 0$ означает, что связи между узлами i и j нет.

Связи между узлами могут быть направленными (ориентированными) или ненаправленными. Для ориентированных сетей в матрице смежности $a_{ij} \neq a_{ji}$, так как направления связи $i \rightarrow j$ и $j \rightarrow i$ различны. В ненаправленных сетях матрица симметрична ($a_{ij} = a_{ji}$).

Более сложные сети могут быть описаны с помощью взвешенных связей, где каждой связи присваивается числовой вес w_{ij} , что позволяет учитывать её интенсивность или значимость. Такие связи описываются весовой матрицей W .

В случае взвешенных подводных беспроводных сенсорных сетей матрица W может обозначать, например, вероятность доставки сообщения. Такое представление дает целостный взгляд на сеть, позволяя эффективно определять прямые и косвенные пути связи. Весовые матрицы позволяют анализировать и оптимизировать маршруты передачи данных благодаря поиску кратчайших путей – с помощью алгоритмов графов (например, алгоритм Дейкстры или Флойда-Уоршелла) можно быстро находить кратчайшие пути между узлами, снижая задержки и энергопотребление. Веса в матрице (например, пропускная способность или емкость узлов) позволяют равномерно распределять трафик. Приоритет коротких и надежных

маршрутов помогает снижать энергозатраты в ресурсозависимых сетях, таких как сенсорные.

В нашем случае весовые матрицы содержат вероятности успешной передачи сообщений $w_{ij} = p(r_{ij})$ между сенсорами i и j .

4. Модифицированный Лувенский метод. Основной целью использования модифицированного Лувенского метода является решение задачи разбиения сети на k кластеров $(C_1, C_2, \dots, C_k)$. Поиск оптимального числа кластеров является отдельной задачей, которая решается в зависимости от выбираемой топологии сети [17 – 19], от наличия в гибридной ПБСС одного или нескольких мобильных шлюзов, частоты съема информации в сети и скорости движения шлюза. В данной работе оптимальным для подводных сетей было принято разбиение, когда число кластеров составляет примерно 5% от общего числа сенсоров в акватории [44]. Это позволит исключить коллизии между различными кластерами и построить маршрут мобильного шлюза таким образом, чтобы данные успевали передаваться на него даже при высокой частоте съема информации.

В качестве базового алгоритма кластеризации в нашем случае был выбран достаточно популярный Лувенский метод (Louvain), который показывает большую точность и превосходит существующие аналоги по вычислительной скорости на сетях с известной структурой [45]. Он используется для анализа сетей, таких как социальные, коммуникационные или сенсорные, и применяется для поиска групп узлов, которые тесно связаны друг с другом.

В основе алгоритма лежит оптимизация коэффициента модулярности M (меры качества разбиения сети на кластеры) кластеров вершин. Она используется для оценки того, насколько хорошо сеть разделена на группы узлов, тесно связанных друг с другом, с минимальным числом связей между различными группами. Коэффициент модулярности M в оригинальном алгоритме представляет собой плотность ребер внутри кластера в диапазоне $[-1, 1]$ в сравнении с количеством межкластерных ребер. Значения, близкие к 1, означают высокую плотность связей внутри кластеров и малое число межкластерных связей. Значение $M = 0$ говорит о том, что разбиение сравнимо со случайным распределением связей. Фактически модулярность – это сумма весов ребер, инцидентных вершинам внутри кластера, за минусом суммы весов ребер вершин, связанных с вершинами других кластеров. Она служит основой для многих алгоритмов кластеризации, включая Лувенский алгоритм.

Лувенский метод нацелен на разбиение сети на кластеры таким образом, чтобы модулярность M , характеризующая плотность связей внутри кластеров по сравнению со связями между кластерами, была максимальной. Высокая модулярность означает, что узлы внутри одного кластера сильно взаимосвязаны, а между кластерами связи минимальны. Использовать понятие модулярности можно как для взвешенных, так и для невзвешенных графов.

В контексте ПБСС модулярность M используется для создания энергоэффективной топологии: кластеризация снижает количество дальних передач, что уменьшает расход энергии. Увеличивается вероятность успешной передачи данных внутри кластеров. Динамическое обновление кластеров на основе модулярности позволяет учитывать изменения в энергосостоянии узлов или потери узлов.

Предложенный модифицированный алгоритм Лувенского метода заключается в использовании некоторого порога δ , ограничивающего число кластеров в акватории.

Изначально, на первой итерации, будем считать, что если вероятность доставки сообщения между двумя узлами меньше 0.5, то эти узлы несвязаны, т.е. значение элемента матрицы смежности для них равно нулю.

Таким образом, в таблице маршрутизации прописаны начальная матрица смежности A и весовая матрица W :

$$a_{ij}(it=0) = 0, \text{ если } p(r_{ij}) < 0.5 ;$$

$$a_{ij}(it=0) = 1, \text{ если } p(r_{ij}) \geq 0.5 ;$$

$$w_{ij} = p(r_{ij}), \text{ для всех узлов сети.}$$

Далее, в модифицированном Лувенском методе при определении коэффициента модулярности предлагается учитывать только те ребра, веса которых больше заданного порогового значения δ . Ребра с меньшими весами, чем пороговое значение δ , не учитываются при кластеризации. В результате эта процедура повторяется итерационно, в зависимости от размеров получаемых кластеров. Пусть первоначально заданная величина порога равна $\delta=0.95$. Это значит, что если вес ребра меньше 0.95, то считается, что эти узлы не связаны, то есть соответствующий коэффициент в матрице

связности становится равен нулю. Если заданный порог δ не приводит к разбиению сети на оптимальное число кластеров (принятое в данной работе равным 5% от общего числа сенсоров в сети), то на следующей итерации он снижается на 0,05.

В данной работе будет проведено сравнение модифицированного Лувенского алгоритма с другими методами и исследование влияния выбранного порога δ на время жизни сети.

Если задать слишком высокий порог (в пределе $\delta=1.00$) то все сенсорами станут вырожденными кластерами и сеть окажется несвязанной. Если задать слишком низкий порог (менее 0.5) то почти все сенсоры в сети окажутся связанными и при равномерном покрытии акватории вся сеть будет одним большим кластером. Пример образования кластеров внутри сети при разных значениях порога δ приведен на рисунке 1.

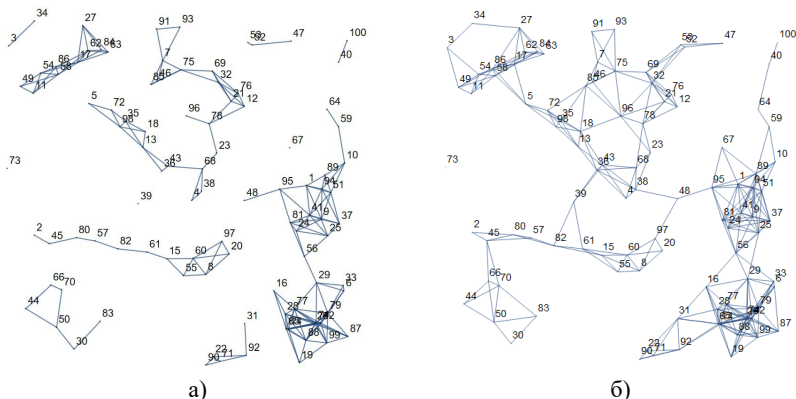


Рис. 1. Построение графа сети с учетом порога δ : а) порог $\delta=0.95$, б) порог $\delta=0.85$

В результате, если число соединенных кластеров начинается с одной вершины, то на каждом шаге алгоритма порог необходимо уменьшать на 0,05. Алгоритм заканчивает работу при достижении оптимального числа невырожденных кластеров.

Значение коэффициента модулярности M рассчитывается как:

$$M = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[a_{ij} w_{i,j} - \frac{w_i w_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (1)$$

где a_{ij} – элемент матрицы смежности равный 1 или 0 на данной итерации, а $w_{i,j}$ – вес ребра между вершинами i и j , которые могут объединиться в кластер ($w_{i,j} > \delta$).

Величины w_i и w_j – это сумма весов ребер i и j , инцидентных вершинам i и j ($w_i > \delta, w_j > \delta$), на которых элементы матрицы смежности равны 1 на данной итерации, так что имеют место формулы:

$$\sum_k w_{jk} a_{ij} = w_j, \sum_l w_{il} a_{ij} = w_i, \quad (2)$$

где вершины k и l – это все узлы сети, связанные с i и j соответственно. Число m – это общее количество рёбер в сети, которые имеют веса больше заданного порога δ , так что отношение $\frac{w_i w_j}{2m}$ – это средневзвешенная вероятность передачи сигнала от узлов i и j по всей сети. Разность между величиной $a_{ij} w_{i,j}$ и этим отношением в формуле (1) показывает, что если вероятность доставки между узлами i и j выше, чем средневзвешенная вероятность передачи сигнала от узлов i и j по всей сети, то она положительна, и узлы имеет смысл сгруппировать в один кластер. Если эта разность отрицательна, то скорее всего узлы должны принадлежать разным кластерам.

$\delta(c_i, c_j)$ – это индикатор принадлежности узлов i и j к одному кластеру ($\delta(c_i, c_j) = 1$, если узлы принадлежат одному кластеру, и $\delta(c_i, c_j) = 0$ иначе). Данный индикатор учитывает только те рёбра, которые соединяют узлы внутри одного и того же кластера.

Коэффициент модулярности отдельного кластера определяется в модифицированном Лувенском методе как:

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^c}{2m} \{c_i = c_j = c\} - \left(\frac{\sum_{i=1}^k (w_i^c + w_i^{c'})}{2m} \{c_i = c\} \right)^2, \quad (3)$$

$$M_c = \frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2,$$

где M_c – модулярность кластера, w_i^c – вес внутрикластерного ребра, больший выбранного порога ($w_i^c > \delta$), а $w_i^{c'}$ – вес межкластерного ребра, больший порога ($w_i^{c'} > \delta$).

Тогда сумма $\sum_{i=1}^n w_i^c = \Sigma_{in}$ – это сумма весов ребер между узлами внутри сообщества с (каждое ребро учитывается дважды). Увеличение величины Σ_{in} приводит к повышению модулярности, так как узлы становятся более "связанными" в рамках кластера. Сумма $\sum_{i=1}^k (w_i^c + w_i^{c'}) = \Sigma_{tot}$ – это сумма всех весов ребер для узлов внутри сообщества (включая ребра, соединяющие узлы сообщества с узлами за его пределами). Чем меньше величина Σ_{tot} , тем меньше "утечек" связей за пределы кластера, что также повышает модулярность.

Суммирование выполняется соответственно до значения n – числа внутрикластерных ребер и до k – общего числа ребер, инцидентных всем вершинам кластера.

Так как узлы в разных сообществах не вносят вклад в модулярность, общее значение модулярности можно записать как:

$$M = \sum_c M_c. \quad (4)$$

В алгоритме можно выделить основные стадии, которые группируются в два этапа:

На первой стадии выполняется поиск локальных кластеров минимальных размеров с оптимальным значением функции модулярности. Каждой вершине присваивается номер своего кластера и рассчитывается модулярность кластеров.

Выбирается произвольный кластер, из которого вершина переставляется по очереди в каждый соседний кластер. После перестановки подсчитывается изменение коэффициента модулярности ΔM до и после перестановки вершины и выбирается кластер с наибольшим изменением модулярности так, что $\Delta M > 0$, в котором закрепляется переставленная вершина. Если ни одна из перестановок не увеличивает модулярность, то вершина остается в том же кластере.

Данный пункт повторяется, пока изменения коэффициента не будут неизменными. Формула ΔM обеспечивает сравнение текущего вклада узла i в модулярность с его вкладом после переноса.

$$\Delta M = \left[\frac{\Sigma_{in} + w_i}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot} + w_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Для каждого узла вычисляется, как его перемещение из текущего кластера в другой (или создание нового кластера) повлияет на значение модулярности ΔM . Узел переносится в тот кластер, который обеспечивает наибольшее увеличение модулярности. Если перемещение узла не улучшает модулярность (или ухудшает её), узел остаётся в своём текущем кластере.

Если узел i имеет сильные связи с другими узлами внутри кластера, перемещение узла в другой кластер снижает Σ_{in} и, как следствие, уменьшает модулярность. Если узел имеет более сильные связи с узлами другого кластера, перемещение увеличивает Σ_{in} в новом кластере и уменьшает связи Σ_{tot} с узлами текущего кластера, что повышает модулярность. Алгоритм находит оптимальный кластер для каждого узла путём итеративных проверок всех возможных перемещений.

Сжатие сети – это второй этап работы Лувенского алгоритма, следующий за локальной оптимизацией модулярности. Этот этап направлен на уменьшение размерности исходной сети путём формирования новой, более компактной сети. На этом этапе узлы, принадлежащие одному кластеру, объединяются в суперузлы.

Общая идея шагов на втором этапе следующая. Граф с кластерами преобразуется в мультиграф. Вершины кластеров объединяются в одну вершину с преобразованием ребер между ними в петли, а кратные ребра между полученными вершинами заменяются одним. Новые веса петель и ребер пересчитываются как среднее арифметическое из весов старых ребер. Эта процедура повторяется, пока не будет достигнута оптимальная величина коэффициента модулярности (когда изменений модулярности больше не будет происходить).

После сжатия сети уменьшается количество узлов и рёбер, что ускоряет последующие итерации алгоритма. Сложные связи между множеством узлов сводятся к простым связям между суперузлами. Это

помогает выявлять кластеры более высокого уровня, если они существуют.

После сжатия алгоритм снова начинает работу с первого этапа – локальной оптимизации, уже для новой, упрощённой сети. Итерации продолжаются до тех пор, пока модулярность не перестанет существенно изменяться. Это завершает работу Лувенского алгоритма, предоставляя финальную кластеризацию сети, рисунок 2.

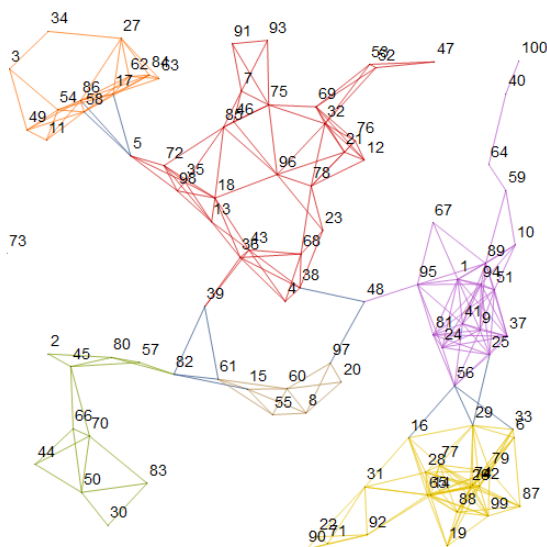


Рис. 2. Результат работы модифицированного Лувенского алгоритма.
Разбиение сети из 100 сенсоров на 5 кластеров

Выбор референсного узла. В каждом кластере нужно выбрать референсный узел. Для этого из общего графа сети выделим подграф, содержащий только узлы, принадлежащие одному кластеру. Для выбора референсного узла при первой кластеризации сети используется средневзвешенная вероятность передачи сигнала от узла i к узлу j , обозначаемая $w(b_j)$, которая показывает, сколько рёбер эффективно (с учетом вероятности доставки) соединяет узел i с другими узлами внутри кластера. Формула расчёта средневзвешенной вероятности передачи сигнала на узел i :

$$w(b_j \in C_l) = \frac{1}{2m_l} \sum_{b_i \in C_l} w_{ij}, \quad (6)$$

где w_{ij} – вероятность успешной передачи данных между узлами i и j , принадлежащими одному и тому же кластеру. Референсным узлом кластера при первой кластеризации назначается узел с наибольшей средневзвешенной вероятностью передачи сигнала:

$$b_{ref(C_l)} = \max_{b_j \in C_l} w(b_j \in C_l). \quad (7)$$

При разряде батарей сенсоров и появлении необходимости динамической рекластеризации сети, узлы с большим числом связей окажутся, очевидно, наиболее разряженными, поскольку через них будет проходить максимальный трафик. Это значит, что кроме связности в дальнейшем необходимо учитывать остаточную энергию сенсора. Обозначим ее как

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{E_0}, \quad (8)$$

E_0 (Дж) – начальный уровень заряда батареи сенсора, E_j (Дж) – текущее состояние заряда батареи, тогда формула расчёта средневзвешенной вероятности передачи сигнала на узел j при рекластеризации заменится на формулу средневзвешенной эффективности работы узла:

$$Eff_{node}(b_j \in C_l) = \frac{1}{2m_l} \sum_{b_i \in C_l} w_{ij} \varepsilon_j, \quad (9)$$

а референсным будет назначен узел

$$b_{ref(C_l)} = \max_{b_j \in C_l} Eff_{node}(b_j \in C_l). \quad (10)$$

Итак, в контексте подводных сенсорных сетей, Лувенский алгоритм используется для группировки сенсоров в кластеры, основываясь на следующих параметрах:

Узлы, расположенные близко друг к другу, объединяются в один кластер для минимизации энергозатрат на передачу данных.

Сенсоры с высокой остаточной энергией чаще выбираются в качестве референсных узлов (глав узлов).

Учитывается вероятность успешной передачи сообщений между узлами, зависящая от расстояния, мощности сигнала и условий среды.

5. Использование модифицированного алгоритма Дейкстры для нахождения оптимальных путей передачи сообщений в кластере. В условиях подводной среды требуется разработка маршрутов передачи сообщений внутри кластеров, которые обеспечат максимальную вероятность успешной доставки сообщений и минимизацию потерь.

Для достижения этой цели в данной модели предложено использование модифицированного алгоритма Дейкстры, адаптированного для поиска путей, которые максимизируют вероятность передачи сообщений, минимизируют энергозатраты и продлевают время жизни сети. Этот подход позволяет не только учитывать расстояние между узлами, но и адаптироваться к специфическим особенностям подводной среды.

В отличие от традиционных методов, фокусирующихся на минимизации расстояний или времени передачи, предложенный алгоритм оценивает вероятность доставки сообщения по каждому возможному маршруту с учетом остаточной энергии узлов. Для каждого сенсора рассчитывается не просто кратчайший путь, а маршрут, обеспечивающий максимальную вероятность передачи данных. Это позволяет значительно сократить количество потерянных сообщений и повысить общую производительность сети.

Алгоритм также учитывает динамические параметры сети, такие как расход энергии на узлах и ухудшение качества связи в определённых участках. Каждый маршрут между двумя сенсорами определяется через последовательность промежуточных узлов, причём выбор ретрансляторов происходит с учётом вероятностей передачи и уровня остаточной энергии. Такой подход обеспечивает гибкость и адаптивность сети, позволяя ей эффективно функционировать даже в условиях изменения окружающей среды и эксплуатационных параметров. В результате сеть становится более устойчивой, долговечной и способной к высококачественной передаче данных в подводных условиях.

В классическом варианте алгоритм Дейкстры [46] ищет кратчайший путь между узлами графа, минимизируя расстояние. В случае ПБСС ключевым фактором становится не минимизация

расстояния, а максимизация вероятности успешной передачи сообщений. Рассмотрим шаги модифицированного алгоритма.

Узлы сенсоров представляются вершинами графа $G = (B, L)$, где B – множество сенсоров, а L – рёбра, представляющие возможные пути связи между сенсорами.

Каждое ребро между узлами i и j имеет вес, определяемый вероятностью успешной передачи сообщения $w_{ij} = p(r_{ij})$, которая в общем случае зависит от расстояния между узлами, акустических характеристик канала и мощности передающего модема и уровнем остаточной энергии узла передатчика i и узла приемника j , так что формула расчёта средневзвешенной вероятности передачи сигнала заменится на формулу средневзвешенной эффективности передачи по ребру:

$$\varepsilon_i = \frac{E_i}{E_0}, \quad \varepsilon_j = \frac{E_j}{E_0}, \quad Eff_{route}(b_i, b_j) = w_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j, \quad (11)$$

где E_0 (Дж) – начальный уровень заряда батареи сенсора, E_i (Дж) и E_j (Дж) – текущее состояние заряда батареи.

Для каждого узла $b \in B$ вводится значение $D(b)$, отражающее текущую вероятность передачи сообщения от исходного узла до узла v . В начале $D(b) = 0$ для всех узлов, кроме исходного узла s , где $D(s) = 1$. С него и начинается работа алгоритма. Он добавляется в маршрут S . Для каждого узла u , соседнего с s , пересчитывается вероятность успешной передачи в соответствии с формулой:

$$D(u) = \max(D(u), D(s) \cdot Eff_{route}(b_s, b_u)), \quad (12)$$

где $Eff_{route}(b_s, b_u)$ – средневзвешенная эффективность передачи по ребру между узлами s и u . Среди всех узлов, не входящих в маршрут S , выбирается узел b с максимальным значением $D(b)$:

$$D(b) = \max_{u \notin S} D(u). \quad (13)$$

Этот узел добавляется в маршрут S . Алгоритм повторяет шаги до тех пор, пока не будут обработаны все узлы в графе или пока не будет найден путь до заданного узла. Построение маршрута возможно только внутри кластера.

В результате в каждом кластере $C_k \subset B$ оказываются построены оптимальные маршруты с наибольшей эффективностью передачи сообщений от референсного сенсора $b_{ref(C_k)}$ к остальным сенсорам в кластере. Определим функцию пути $\mathcal{R}(b_i, b_j)$ как путь между двумя сенсорами b_i и b_j через цепочку промежуточных сенсоров с вероятностью передачи:

$$Eff_{route}(b_i, b_j) = \prod_{k=1}^m Eff_{route}(b_k, b_{(k+1)}), \quad (14)$$

где m – количество промежуточных сенсоров на пути. Модифицированный алгоритм Дейкстры находит путь $\mathcal{R}(b_i, b_{ref(C_k)})$ с наибольшей эффективностью передачи сообщения для каждого ($b_i \in C_k$). Для каждого узла учитывается остаток энергии, что позволяет избегать маршрутов через узлы с критически низким уровнем заряда.

Вместо одного оптимального пути могут быть рассчитаны несколько маршрутов с высокой вероятностью передачи, что повышает надёжность сети. Алгоритм применяется локально для кластеров, что снижает вычислительные затраты и повышает масштабируемость сети.

После нахождения оптимальных путей передачи данных с помощью модифицированного алгоритма Дейкстры от каждого сенсора до референсного узла $b_{ref(C_k)}$ в кластере C_k , каждый сенсор получает одну из следующих ролей. Референсный узел $b_{ref(C_k)}$, это узел, который отвечает за сбор данных от всех остальных сенсоров в кластере. Сенсор ретранслятор b_i , это сенсор, который находится на пути передачи данных от других сенсоров к референсному. Сенсор b_i классифицируется как клиент, если он передает свои данные через ретранслятор, но не участвует в ретрансляции сообщений других узлов (крайний сенсор в цепочке передачи сообщений). Если путь от сенсора

b_i до референсного узла содержит только его самого и референсный узел, то он считается соло сенсором.

Ретрансляторы, клиенты и соло сенсоры являются обычными сенсорами, в отличие от референсных, которые собирают все сообщения и передают их на мобильный шлюз. Необходимо отметить, что сенсоры клиенты и соло обладают наибольшим запасом энергии, так как им требуется передать только одно свое сообщение.

Уровни ретрансляции определяют положение ретрансляторов на пути от обычных сенсоров до референсного узла. Для вычисления уровня ретрансляции необходимо рассчитать число промежуточных узлов между ретранслятором и референсным узлом. Присвоение уровня происходит в порядке от референсного узла к периферийным узлам.

6. Управление доступом к среде на основе расписания передач. Для управления доступом к среде в предлагаемой модели было использован один из наиболее распространенных методов управления доступом к среде в ПБСС – TDMA мультиплексирование с разделением по времени [47]. В TDMA каждому узлу назначается отдельный периодический временной интервал (слот), в течение которого он может передавать пакет без помех от других узлов в сети. Рассмотрим реализацию такого протокола. Итак, в активной фазе узлы бодрствуют в некоторых слотах и спят в течение оставшихся слотов, когда нет передачи или приема данных. Эта фаза разделена на несколько TDMA-кадров, каждый из которых состоит из нескольких слотов. Эти слоты зарезервированы путем присвоения каждому узлу своего номера. Другими словами, каждый номер представляет собой временное резервирование канала, оптимальное пространственное распределение номеров – это отдельная оптимизационная задача, которая решается за счет использования минимального количества номеров. Сенсоры с одинаковыми номерами могут одновременно передавать пакеты данных без каких-либо коллизий. Длина каждого слота фиксирована и равна задержке распространения сигнала в акватории плюс небольшое защитное время. Защитное время используется для обеспечения того, чтобы отдельные передачи не мешали друг другу.

На первом этапе временные слоты выделяются для сенсоров, работающих в режиме соло (без ретрансляторов). На следующем этапе временные слоты назначаются сенсорам-клиентам. Алгоритм принимает на вход список всех сенсоров. Затем происходит итеративный перебор сенсоров, пока все не будут распределены по

временным слотам. При распределении сенсора в слот проверяются следующие условия:

Отсутствие интерференции: сенсор может быть назначен в слот только в том случае, если он находится на таком расстоянии, чтобы не создавать помех сенсорам, уже распределённым в данный временной слот.

Уникальность адреса: в данном слоте не должно быть других сенсоров, отправляющих данные в тот же целевой сенсор.

Учет минимального номера слота: номер текущего слота должен быть больше минимального допустимого номера для рассматриваемого сенсора.

Если сенсор распределён во временной слот с номером i , то для сенсора, которому он отправляет данные, значение минимального номера слота обновляется. Новое значение будет на единицу больше текущего слота, если ранее заданное значение меньше.

В каждом TDMA-кадре каждый сенсор знает о своих собственных зарезервированных временных слотах в зависимости от его номера, а также о слотах, зарезервированных его соседними узлами. Таким образом, они могут запланировать активацию либо для передачи своего собственного пакета данных в течение зарезервированных слотов, либо для получения пакета данных от соседнего узла. Они спят в других оставшихся слотах, когда нет передачи или приема данных. Эта схема повторяется в течение каждого TDMA-кадра. Продолжительность этой фазы, т. е. количество TDMA-кадров, зависит от изменений топологии из-за смещения сенсора или истощения энергии. Для этой фазы следует рассматривать более короткую продолжительность в сценариях с быстрыми изменениями топологии и более длительный период в сценариях со стационарными или ограниченными мобильными узлами.

Длина каждого TDMA-кадра находится в обратной зависимости от скорости передачи данных, которая представлена в единицах пакетов в секунду. Чем выше скорость передачи данных, тем короче время цикла и, следовательно, меньше время ожидания.

Каждый TDMA-кадр разделен на количество N_{slot} слотов одинакового размера. Количество слотов можно рассчитать следующим образом:

$$N_{slot} = \frac{T_{frame}}{t_{slot}}, \quad (15)$$

T_{frame} – это максимальное время передачи всех сообщений в сети за один кадр, рассчитанное на основе наихудшего случая, когда каждый сенсор может иметь свой собственный слот для отправки сообщения (в таком случае количество слотов равно количеству сенсоров). В работе эта величина принята как константа, равная 7.8 сек.

Длина слота имеет вид:

$$t_{slot} = t_s + T_C + \tau \quad (16)$$

и складывается из времени, необходимого для отправки сообщения $t_s = 0.02$ с, задержки распространения сигнала $T_C = 2 \frac{r}{v_c}$ и τ – это некоторое защитное время, которое используется для обеспечения того, чтобы отдельные передачи не мешали друг другу. Каждому сенсору в течении одного кадра разрешено выходить в эфир только один раз (в одном из временных слотов). Время T_c пока сигнал распространяется в водной среде, сенсор не может ни отправлять другие сообщения, ни получать, а вынужден находиться в режиме ожидания.

7. Динамическая рекластеризация. Процесс динамической реконфигурации кластерной структуры в подводной беспроводной сенсорной сети играет решающую роль в поддержании её устойчивой и энергоэффективной работы в течение продолжительного времени. Сеть, состоящая из множества сенсорных узлов, сгруппированных в кластеры, сохраняет свою функциональность до тех пор, пока достаточное количество узлов обладает необходимым уровнем энергии для передачи сообщений. По мере того, как энергетические ресурсы отдельных узлов истощаются, становится необходимым пересмотреть структуру сети и перераспределить функциональные обязанности между оставшимися активными узлами.

На каждом этапе передачи данных осуществляется контроль текущего энергетического состояния узлов. Каждый сенсор b_i имеет уровень заряда E_i , и если он опускается ниже заданного порогового значения $E_i < E_{\min}$, узел считается неактивным и исключается из дальнейшей маршрутизации. Перестройка сети активируется в момент, когда хотя бы один узел достигает критического энергетического уровня $E_i < E_{\min}$.

В результате запускается механизм динамической адаптации сети, который включает в себя пересчёт вероятностей для новой кластеризации, обновление матриц связей между узлами, а также

формирование обновлённой топологии и пересмотр временного расписания кластеров.

Процесс передачи данных продолжается в новой конфигурации сети до тех пор, пока количество активных сенсоров B_{act} не упадет ниже определенного порогового значения, при котором сеть считается неработоспособной: $B_{act} < B_{min}^{act}$.

Перейдем теперь к этапу имитационного моделирования.

Опишем коммуникационную 3D архитектуру подводной беспроводной сенсорной сети, которая будет оптимизирована с использованием нового разработанного алгоритма.

8. Коммуникационная структура ПБСС в трёхмерном пространстве. В данной модели подводная беспроводная сенсорная сеть развёрнута в акватории с неоднородными физическими характеристиками среды и имеет трёхмерную пространственную организацию. Сеть включает в себя как обычные сенсоры, так и референсные узлы, размещённые в произвольной 3D-конфигурации. Для сбора и передачи данных используется мобильный шлюз, которым может выступать волновой глайдер или другое автономное устройство, способное перемещаться в водной среде, рисунок 3.

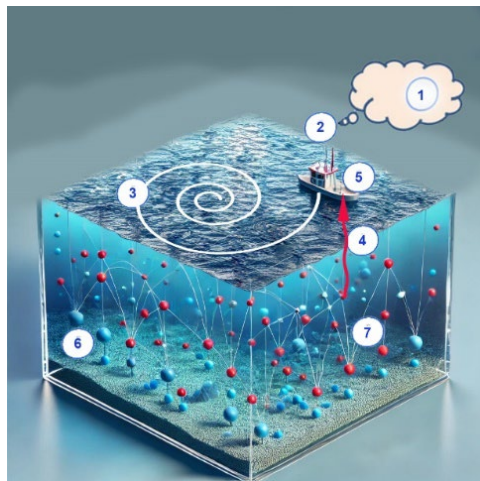


Рис. 3. Модель 3D подводной беспроводной сенсорной сети с одним мобильным шлюзом для произвольной 3D-топологии сети. 1 – центр обработки данных, 2 – линия беспроводной связи, 3 – траектория шлюза, 4 – мобильный шлюз, 5 – гидроакустический канал, 6 – обычные сенсоры, 7 – референсные сенсоры

Сеть организована в виде множества кластеров, каждый из которых содержит свой референсный узел, расположенный в определённой области и принимающий данные от обычных сенсоров, находящихся в пределах данного кластера. Обычные сенсорные узлы осуществляют измерения набора физических характеристик окружающей среды, проводят первичную обработку информации и передают её на референсный узел – либо напрямую, либо через промежуточных соседей по кластеру. После этого референсные узлы агрегируют полученные данные и отправляют их вверх по иерархии – на мобильный шлюз.

В рамках имитационного моделирования функционирования ПБСС используется трёхмерное представление подводной акватории. Пространство моделируется в виде объёма с площадью $S = n \times n$ в горизонтальной проекции и глубиной h . Сенсоры b_i размещаются в этом объёме либо равномерно, либо в соответствии с заданной схемой, зависящей от специфики наблюдаемой среды. Такое размещение может учитывать, например, температурные градиенты, а также особенности рельефа дна.

Каждый сенсор характеризуется координатами в пространстве $\vec{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$, где x_i, y_i задают положение в горизонтальных слоях, а z_i – глубину размещения сенсора по вертикали. Эти координаты определяют начальную топологию сети. Распределение узлов может быть равномерным или следовать заданной модели. Предлагается использовать:

Случайное распределение, при котором в плоскости $x_i, y_i \sim U(0, n)$, а по вертикали $z_i = z_0$. Регулярную модель, которая предполагает, что сенсоры располагаются в узлах регулярной решетки с шагом, равномерно покрывающей всю область: $x_i = i \cdot s, y_j = j \cdot s, z = z_0$. Регулярную решётку с отклонением:

$$x_i = i \cdot s + \epsilon_x, \quad y_j = j \cdot s + \epsilon_y, \quad z = z_0, \quad (17)$$

$$\epsilon_x, \epsilon_y \sim U(-\Delta, \Delta),$$

где Δ задаёт амплитуду отклонений.

Псевдослучайное распределение, созданное на основе последовательности Халтона: $(x_i, y_i) = \text{Halton}(b_1, b_2, i)$, где b_1, b_2, i –

взаимно простые основания последовательности Халтона, i – индекс сенсора.

Четыре предлагаемые модели распределения предоставляют гибкость в выборе начальной топологии сети в зависимости от задач и требований к покрытию акватории. Данный выбор топологий обоснован в первую очередь учетом особенностей реальной эксплуатации сети, где объекты не могут располагаться в точно заданных позициях (процесс сброса сенсоров всегда осуществляется с некоторой неопределенностью, связанной с не одномерной скоростью хода судна обеспечения, морским волнением и человеческим фактором).

Все сенсоры разделяются на набор кластеров, каждый из которых состоит из группы узлов, связанных друг с другом. В рамках кластера информация передается к центральному референсному узлу и далее на мобильный шлюз.

Модель коммуникации может учитывать стохастическую природу подводной среды, где вероятность успешной передачи сообщений определяется как стационарными параметрами, заданными в модели среды, так и изменяющимися условиями, включая временные и пространственные колебания параметров.

9. Модель подводной среды. Коммуникационная модель описывает процесс обмена сообщениями между сенсорами, где вероятность успешной передачи сигнала $p(r_{ij})$ между двумя узлами b_i и b_j определяется условиями среды и расстоянием r_{ij} между ними. С увеличением этого расстояния, а также при неблагоприятных параметрах среды, вероятность успешной доставки уменьшается. На результат передачи влияют характеристики используемого модема, свойства среды и особенности распространения сигнала. Поэтому модель среды должна учитывать такие важные факторы, как затухание акустических волн, многолучевое распространение, шумы и прочие физические особенности океанической среды.

Одним из ключевых параметров, характеризующих качество подводной связи, является вероятность ошибки на бит, и служит важным показателем надёжности передачи информации в условиях воздействия аддитивного белого гауссовского шума [48].

Следуя [49], считаем, что температура, солёность и кислотность постоянны, тогда коэффициент затухания сигнала в среде при заданной частоте звуковых колебаний можно оценить по обобщенной формуле Торпа [49].

В подводной среде, где распространение сигнала сопровождается значительным затуханием, шумами и многолучевыми

эффектами, одним из ключевых факторов, влияющих на качество связи, является битовая ошибка (BER). Важно учитывать это при использовании двоичной фазовой манипуляции (BPSK), одного из наиболее надёжных методов модуляции в шумной среде. Если сигнал распространяется в канале с рэлеевским замиранием, то есть с эффектом случайных глубоких провалов амплитуды сигнала, вызванных многолучевыми отражениями, то битовая ошибка между передающим и принимающим устройствами может быть рассчитана, следуя [50].

Чем выше BER – тем ниже вероятность того, что пакет дойдёт до адресата без ошибок. Явная связь между физическими параметрами среды и вероятностью успешной доставки данных, и, следовательно, с надёжностью всей системы приведена авторами в работах [51 – 53].

10. Проектные параметры моделирования функциональных характеристик ПБСС. Технические параметры модема, такие как мощность модема P_{bi} , несущая частота f и полоса пропускания используются в модели среды, позволяя рассчитать вероятность успешной доставки сообщения вдоль заданного ребра, соединяющего два сенсора. Модель позволяет использовать и другие технические параметры, такие как характеристики (например, направленность) антенны. В предлагаемой работе антенна считается ненаправленной. В дальнейшем в имитационной модели использованы следующие проектные параметры. Частота работы модема принята равной $f = 60$ кГц с полосой частот $B = 30$ кГц, битовая скорость – $f_{bit} = 12,8$ кбит/с. Считается, что все передаваемые сообщения s имеют одинаковую длину $N_{bit} = 256$ бит. Суммарное время передачи сообщения и получения подтверждения о доставке определяется как $t_s = N_{bit} / f_{bit} = 0.02$ с.

Энергетическое состояние E_i сенсора, это уровень оставшейся энергии сенсора, уменьшающийся при каждой передаче, приёме сообщений и в режиме ожидания. Энергия сенсоров – ключевой параметр, определяющий срок службы сети. В частности, выполняя рекластеризацию и выбирая новые референсные узлы исходя из их энергетического состояния E_i , можно добиться существенного увеличения времени жизни сети. Энергетические характеристики модемов приняты следующими: $P_s = 25$ Вт – максимальная излучаемая мощность передающего модема; $E_s = P_s \cdot t_s = 0.5$ Дж – энергия, необходимая для отправки одного сообщения; $P_w = 0.3$ Вт – мощность,

затраченная на ожидание и прием сообщения, эмпирическая цифра для процессорной системы, ожидающей прием сообщения; $P_{inf} \approx P_w$ – мощность, затраченная на сбор информации. Это средняя мощность работающей процессорной системы с малым потреблением энергии; $E_0 = 864$ кДж – емкость батареи напряжением 12В.

Предполагается, что время работы сети между двумя измерениями равно T . За это время все результаты измерений должны быть доставлены в мобильный шлюз.

Для определения оптимальной архитектуры сети используется разработанная авторами математическая модель, основанная на вероятностном подходе и критериях оптимальности функционирования ПБСС с точки зрения связности. При этом учитывается ограничение на максимальное число перепосылок, необходимых для успешной доставки сообщений.

Не все попытки передать сообщение от сенсорного узла соседу могут оказаться успешными. Если допустить возможность многократных попыток передачи, осуществляемых через определенные интервалы времени, то доставка сообщения от сенсорного устройства к референсному узлу будет случайной величиной, зависящей от вероятности связности сети. Будем считать, что, если после фиксированного числа передач ближайшим соседям сообщение не доставлено, оно считается потерянным и сенсор переходит к пересылке следующего стоящего в очереди сообщения.

11. Вычислительные эксперименты. Имитационный комплекс моделирования разработан на основе языка программирования Python с использованием дополнительных библиотек. На первом этапе было проведено исследование зависимости исходного количества кластеров от выбранного порога кластеризации δ , частоты передачи сигнала и расстояний между сенсорами в акватории для 3D сети из 100 сенсоров.

Первый этап показал, что при регулярном или близком к регулярным расположениям сенсоров введение порога δ кластеризации незначительно меняет число кластеров в сети, и оно сохраняется в пределах близких к 5% от общего количества. При увеличении частоты сигнала при одинаковых расстояниях количество кластеров увеличивается, что обусловлено большей потерей данных на больших частотах.

На следующем этапе было проведено сравнительное моделирование разработанного алгоритма с алгоритмами LEACH, ICA, PPWURC и др. [51]. Входные параметры моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Входные параметры моделирования

Проектные параметры сети	Числовые характеристики
Размер акватории (м)	150×150×150
Начальная энергия (Дж)	40
Частота передачи сигнала (кГц)	40
Количество сенсоров (шт)	30

Рассматривался вариант случайного распределения сенсоров в акватории. Результаты согласно параметрам из таблицы 2 представлены на рисунке 4.

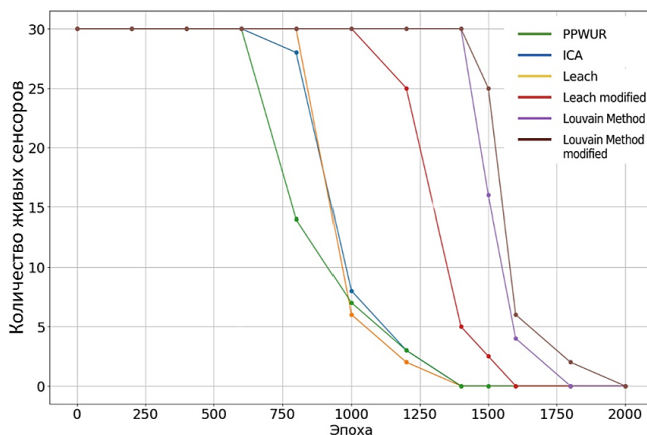


Рис. 4. Зависимость количества живых сенсоров от количества эпох для различных алгоритмов

Второй эксперимент показал значительное увеличение времени автономной работы сети при применении Лувенского алгоритма по сравнению с другими алгоритмами. Для конфигурации с 30 сенсорами начало отказа работы сети (первый выход из строя узла) наблюдается лишь после 1400-й эпохи, тогда как при использовании других методов кластеризации сенсоры начинают выходить из строя уже к 1000-й эпохе или ранее. На представленном графике также видно, что использование порогового значения 0.95 в модифицированной версии Лувенского алгоритма позволяет дополнительно замедлить темпы разряда сенсоров примерно на 3% по сравнению с базовой версией алгоритма, за счет небольшого увеличения общего числа кластеров и тем самым обеспечивая более плавное снижение количества рабочих узлов.

Следующий этап представляет собой анализ влияния различных значений порогового ограничения кластеризации в Лувенском алгоритме на время жизни подводной сенсорной сети. В рамках исследования рассматривались пороговые значения δ , равные 0.95, 0.8, 0.7, 0.5, а также вариант без порогового ограничения. В качестве тестовой области была выбрана акватория размером $10\,000 \times 10\,000$ метров. Сеть имела пространственную структуру: сенсоры были размещены на трёх фиксированных уровнях глубины – 100, 300 и 500 метров. В каждом слое располагалось по 100 сенсоров, размещённых на основе регулярной ортогональной решётки с заданным случайным отклонением координат. Критерием завершения работы сети считался выход из строя 200 сенсоров. Пример рассматриваемой топологии сенсорной сети приведен на рисунке 5.

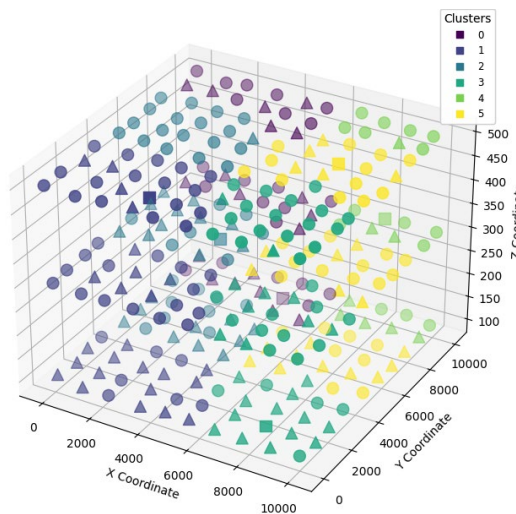
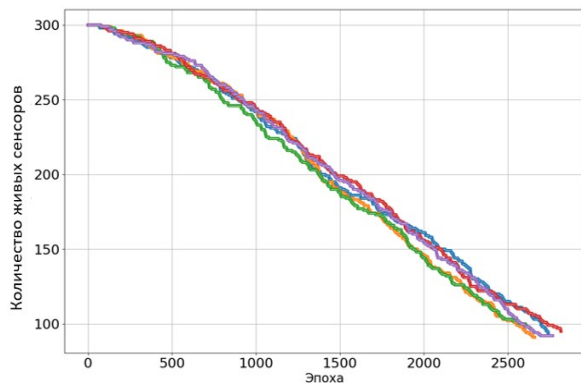


Рис. 5. Результат построения регулярной решетки ПБСС со случайными отклонениями и ее топологической кластеризации (треугольники – сенсоры ретрансляторы; квадраты – сенсоры референсы)

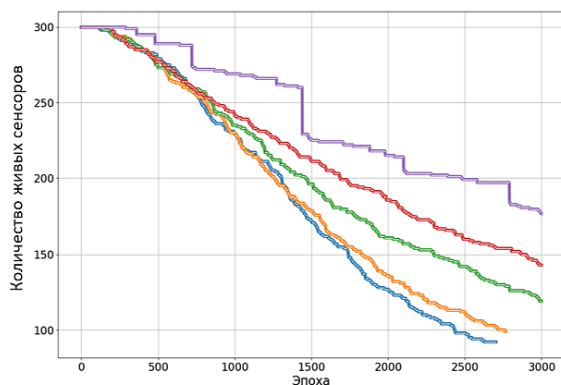
Результаты работы сети на частоте 30 кГц и 70 кГц представлены на рисунке 6.

Из сравнения графиков на рисунке 6 видно, что работа сети на частоте 30 кГц при выбранной топологии оказывается практически не чувствительна к изменению порога кластеризации. Это связано с тем, что выбранные проектные параметры обеспечивают надежную передачу сигнала и увеличение порога не приводит к увеличению

числа кластеров. При 70 кГц мы наблюдаем другую картину – увеличение порога приводит к невозможности сенсоров объединиться в кластеры, сеть распадается на большое число кластеров. Это приводит к увеличению времени жизни сети, но одновременно нарушает ограничение, наложенное на число референсных агентов (кластеров) в сети.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость количества живых сенсоров от времени работы сети:

а) – при работе на частоте 30 кГц, б) – при работе на частоте 70 кГц.

Фиолетовая линия – $\delta=0.95$, красная – $\delta=0.8$, зеленая – $\delta=0.7$,

оранжевая – $\delta=0.5$, синяя – без порога

При пороге $\delta=0.95$ время работы ПБСС на частоте 70 кГц ПБСС имеет ступенчатую кривую разряда. Это связано с тем, что при данном

значении порога ПБСС обладает большим начальным количеством кластеров при каждой рекластеризации. По достижении 3000 эпох, количество рабочих сенсоров для $\delta=0.8$ составляет 148, для $\delta=0.7$ количество рабочих сенсоров составляет 125, в то время как для значений $\delta=0.5$ и $\delta=0.0$ (без порога) сеть прекратила работу на 2750 эпохе и 2680 эпохе соответственно.

Результаты сопоставления времени разряда первого сенсора в ПБСС и начального количества кластеров при различных значениях порога δ представлены на рисунке 7.

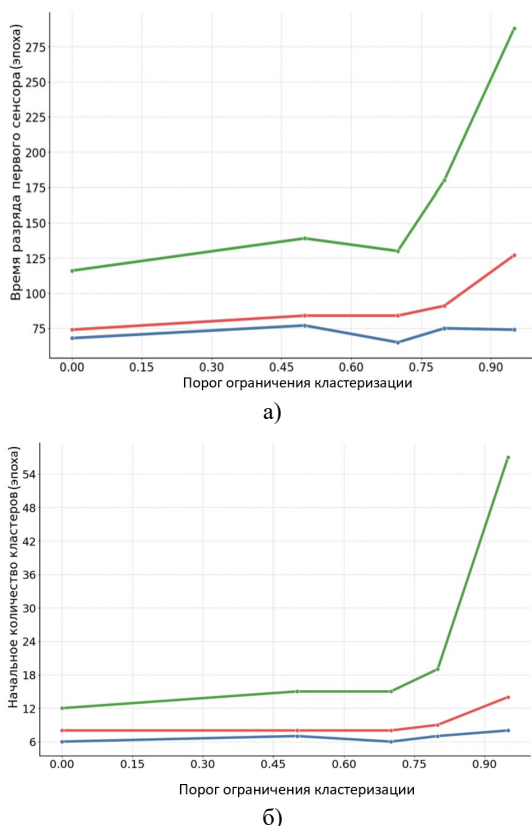


Рис. 7. Результаты работы сети: а) – время разряда первого сенсора; б) – начальное количество кластеров, синяя линия – 30 кГц, красная линия – 50 кГц, зеленая линия – 70 кГц

Результаты, представленные на рисунке 7 наглядно показывают, что при выбранных проектных параметрах сети изменение порога кластеризации от 0 до 0.7 практически не меняет число кластеров и, следовательно не влияет на время жизни сети вне зависимости от частоты передачи сигнала. Для частоты 30 кГц сеть будет разбита на 6 кластеров, для частоты 50 кГц – на 7-8 кластеров, а при частоте 70 кГц – от 12 до 15 кластеров. При пороге выше 0.7 картина меняется – число кластеров начинает расти и к порогу 0.9 достигает для частоты 30 кГц 7-8 кластеров, для частоты 50 кГц – 10-12 кластеров. Однако для 70 кГц мы наблюдаем резкий рост числа кластеров и общее количество достигает 54 кластеров, что не удовлетворяет исходной постановке задачи. Следовательно, несмотря на резкое увеличение времени жизни сети, такой порог не подходит для гибридных ПБСС с мобильным шлюзом.

Из анализа, проведенного выше, можно сделать вывод, что заданный набор проектных параметров, в частности выбранная несущая частота, требует индивидуальной настройки работы алгоритма.

При частоте 70 кГц и пороге $\delta=0.95$ разряд первого сенсора ПБСС происходит с 275 эпохи, что существенно превышает начальный момент разряда ПБСС при частотах 50 и 30 кГц и том же значении порога δ . Аналогичная картина наблюдается и на графике начального количества сенсоров ПБСС (начальное количество сенсоров при пороге $\delta=0.95$ равно 55 (что составляет 18% от всей ПБСС)).

Дополнительно был проведен анализ работы сети при разных расстояниях между сенсорами. Рассматривались расстояния между сенсорами от 800 до 2000 м. Результаты оценки времени жизни сети от расстояния между сенсорами, при разных частотах передачи данных и разных порогах ограничения кластеризации представлены на рисунке 8.

Модель среды, определяемая формулами (2)-(4) характерна водопадоподобным видом снижения вероятности успешной передачи сигнала на определенных расстояниях, зависящих от несущей частоты. На этих же расстояниях на рисунке 9 мы можем наблюдать резкое увеличение времени жизни сети, связанное с увеличением числа кластеров выше допустимого.

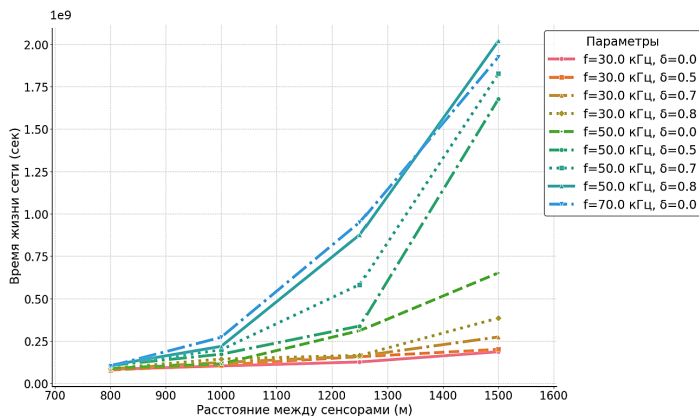


Рис. 8. Зависимость времени жизни сети от расстояния между сенсорами

На рисунке 9 показана зависимость времени жизни сети от порога кластеризации при разных расстояниях между сенсорами в акватории.

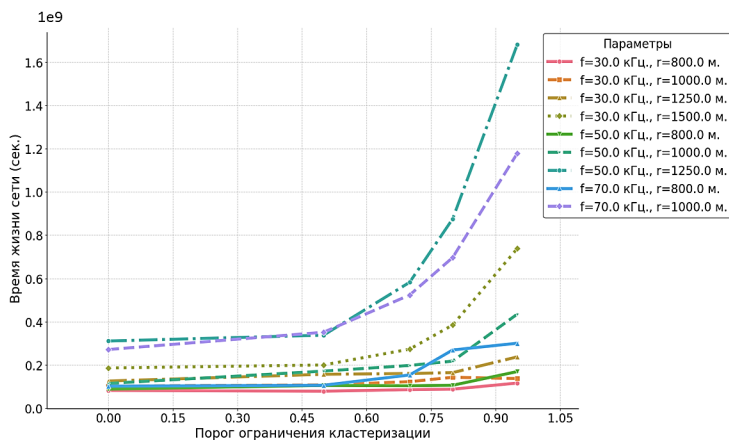


Рис. 9. Зависимость времени жизни сети от порога ограничения кластеризации

На рисунке 9, также как выше на рисунке 7(а) мы наблюдаем увеличение времени жизни сети после превышения порога 0.7 вследствие резкого увеличения общего числа кластеров.

При данных характеристиках ПБСС обладает большим количеством кластеров, в следствии чего время работы сети возрастает.

Исследуем зависимость количества кластеров в сети от порога кластеризации. На рисунке 10 показана динамика числа кластеров при различных частотах в зависимости от выбранного порога кластеризации.

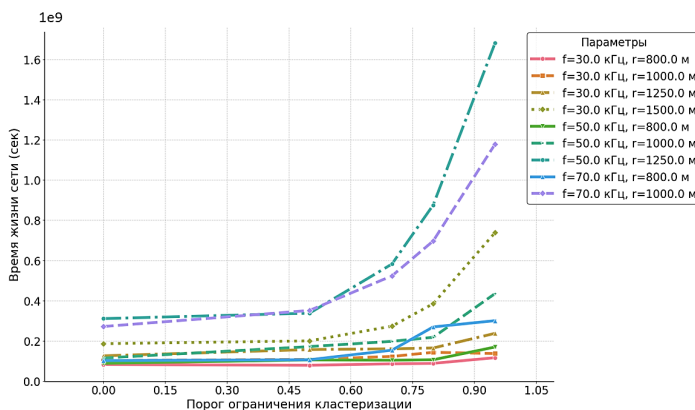


Рис. 10. Зависимость начального количества кластеров от порога ограничения кластеризации

Как видно из рисунка 10 количество кластеров остается в допустимом диапазоне (около 5% от общего количества сенсоров сети) при значениях частоты 30 кГц и 50 кГц, что согласуется с предыдущими графиками.

Таким образом, полученные результаты имитационного моделирования указывают на то, что оптимальным значением порога δ , обеспечивающего надежную работы гибридной ПБСС являются значения от 0.5 до 0.8 при работе сети на частоте 30 кГц и 50 кГц.

12. Заключение. Предлагаемая в данной работе имитационная модель, основанная на модификации таких известных алгоритмов, как Лувенский алгоритм и алгоритм Дейкстры эффективно решает ряд ключевых задач, связанных с управлением ресурсами в подводных беспроводных сенсорных сетях (ПБСС). Во-первых, предложенный алгоритм маршрутизации повышает надёжность передачи данных за счёт оптимизации процессов пересылки, что значительно снижает количество потерянных сообщений. Во-вторых, достигается существенная экономия энергии путём равномерного распределения нагрузки между узлами и рационального использования ретрансляторов. Реализованный протокол связи на основе TDMA позволяет осуществлять параллельную передачу данных в различных

временных слотах, что уменьшает вероятность помех, сокращает общее время работы сети и, соответственно, снижает энергозатраты. Механизм динамической рекластеризации дополнительно повышает устойчивость сети и продлевает срок её автономного функционирования за счёт адаптации к изменениям уровня энергии и структуры сети.

Использование модифицированного Лувенского алгоритма с введением порога кластеризации в подводных сетях оказалось эффективным по следующим причинам. Результаты серии экспериментов показали, что время жизни гибридной подводной сенсорной сети (ПБСС) с мобильным шлюзом существенно зависят от параметров кластеризации, в частности – от порогового значения δ , используемого в Лувенском алгоритме. Если время обхода референсных узлов мобильным шлюзом является критическим параметром (что верно для сетей с высокой частотой съема информации), то предпочтительно выбирать частоты в интервале 30-50 кГц и высокий, порядка $\delta=0.8$ порог кластеризации. Это обеспечит необходимое количество кластеров с надежными связями внутри каждого кластера.

Если предполагается использование несущей частоты более 70 кГц, то в сетях с высокой частотой съема информации предпочтительнее использовать классический лувенский алгоритм, чтобы избежать образования большого числа кластеров. При низкой частоте съема информации возможно использование порога вплоть до $\delta=0.95$, это увеличит время жизни сети, но приведет к возникновению очень большого числа кластеров.

Сочетание модифицированных Лувенского алгоритма и метода Дейкстры в рамках предложенной модели позволило создать устойчивую, адаптивную и энергоэффективную кластерную архитектуру для ПБСС. Сравнительный анализ результатов моделирования показывает преимущество предложенного подхода по таким показателям, как увеличение времени автономной работы сети и повышение надёжности доставки данных по сравнению с решениями, предложенными в других исследованиях.

Таким образом, полученные в работе результаты подтверждают высокую эффективность предложенной модели как с теоретической, так и с практической точек зрения. Модифицированный Лувенский алгоритм с адаптируемым порогом кластеризации, интегрированный с маршрутизацией на основе алгоритма Дейкстры, позволяет гибко адаптировать сетевую топологию к различным условиям среды и режимам эксплуатации. Применение данной модели обеспечивает не

только надёжную передачу данных и оптимальное распределение нагрузки, но и позволяет учитывать физические ограничения подводной среды и особенности проектных требований. Это делает модель перспективной основой для дальнейшей разработки интеллектуальных систем управления ресурсами в подводных сенсорных сетях, ориентированных на длительное автономное функционирование и высокую устойчивость в сложных гидроакустических условиях.

Литература

1. Zorzi M., Casari P., Baldo N., Harris A.F. Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks // IEEE J. Sel. Areas Commun. 2008. vol. 26. no. 9. pp. 1754–1766.
2. Davis A., Chang H. Underwater wireless sensor networks // Proceedings of the IEEE Oceans. 2012. pp. 1–5.
3. Freitag L., Grund M., Singh S., Partan J., Koski P., Ball K. The WHOI micro-modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms // Proceedings Oceans MTS/IEEE. 2005. vol. 2. pp. 1086–1092.
4. Rahman M.A., Lee Y., Koo I. EECOR: an energy efficient cooperative opportunistic routing protocol for underwater acoustic sensor networks // IEEE Access. 2017. vol. 5. pp. 14119–14132. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2730233.
5. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges // Ad Hoc Netw. 2005. vol. 3(3). pp. 257–279. DOI: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
6. Pompili D., Melodia T., Akyildiz I.F. Distributed routing algorithms for underwater acoustic sensor networks // IEEE Trans. Wireless Commun. 2010. vol. 9. no. 9. pp. 2934–2944. DOI: 10.1109/TWC.2010.070910.100145.
7. Lu Q., Liu F., Zhang Y., Jiang S. Routing Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks: A Survey from an Application Perspective // Advances in Underwater Acoustics. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68900.
8. Azam I., Majid A., Khan T., et al. Avoiding Energy Holes in Underwater Wireless Sensor Networks with Balanced Load Distribution // 10th International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive System (CISIS). 2016. pp. 341–350. DOI: 10.1109/CISIS.2016.109.
9. Chaaf A., Muthanna M.S.A., Muthanna A., et al. Energy-Efficient Relay-Based Void Hole Prevention and Repair in Clustered Multi-AUV Underwater Wireless Sensor Network // Security and Communication Networks. 2021. vol. 2021. no. 1. DOI: 10.1155/2021/9969605.
10. Khan Z.A., Karim O.A., Abbas S., Javaid N., Zikria Y.B., Tariq U. Q-learning based energy-efficient and void avoidance routing protocol for underwater acoustic sensor networks // Computer Networks. 2021. vol. 197. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.10839.
11. Mhemed R., Phillips W., Comeau F., Aslam N. Void avoiding opportunistic routing protocols for underwater wireless sensor networks: A survey // Sensors. 2022. vol. 22(23). DOI: 10.3390/s22239525.
12. Tokmachev D.A., Chensky A.G., Zolotarev N.S., Poletaev A.S. Modelling of a hydroacoustic modem for underwater communications // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. vol. 1728. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012021.

13. Chen H., Zhu Y., Zhang W., Wu K., Yuan F. Underwater Acoustic Micromodem for Underwater Internet of Things // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. vol. 2022. no. 1. DOI: 10.1155/2022/9148756.
14. Sherlock B., Morozs N., Neasham J., Mitchell P. Ultra-low cost and ultra-low-power, miniature acoustic modems using multipath tolerant spread spectrum techniques // *Electronics*. 2022. vol. 11. no. 9. DOI: 10.3390/electronics11091446.
15. Li J., Tong F., Jiang W., Roy S. Underwater acoustic modem with high precision ranging capability based on second-level cesium atomic clock // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. vol. XLVI-3/W1-2022. pp. 75–80, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-75-2022.
16. Zia I., Poncela J., Otero P. State-of-the-Art Underwater Acoustic Communication Modems: Classifications, Analyses and Design Challenges // *Wireless Personal Communications*. 2021. vol. 116. pp. 1325–1360. DOI: 10.1007/s11277-020-07431-x.
17. Datta A., Dasgupta M. Energy efficient topology control in underwater wireless sensor Networks. *Computers and Electrical Engineering*. 2023. vol. 105. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108485.
18. Sutagundar A.V., Halakarnimath B.S., Bhadjantri L.B. et al. A Novel Approach of topology control in underwater sensor networks // *IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*. 2022. pp. 1–5. DOI: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972400.
19. Choudhary M., Goyal N. Dynamic topology control algorithm for node deployment in mobile underwater wireless sensor networks // *Concurrency and Computation Practice and Experience*. 2022. vol. 34(15). DOI: 10.1002/cpe.6942.
20. Hu Y., Hu K., Liu H. et al. An energy-balanced head nodes selection scheme for underwater mobile sensor networks // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2022. no. 63. DOI: 10.1186/s13638-022-02141-3.
21. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Semenov N.N. and Sulaiman Sh.A. Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway // *Journal of Marine Science and Application*. 2022. vol. 21. pp. 179–196. DOI: 10.1007/s11804-022-00268-9.
22. Ahmad I., Rahman T., Zeb A., et al. Cooperative Energy-Efficient Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks // *Sensors*. 2022. vol. 22. DOI: 10.3390/s22186945.
23. Bharny S., Sharma S., Alsharabi N., Eldin E.T., Ghamry N.A. Energy-efficient clustering protocol for underwater wireless sensor networks using optimized glowworm swarm optimization // *Front. Mar. Sci.* 2023. vol. 10. DOI: 10.3389/fmars.2023.1117787.
24. Sheeja R., Iqbal M.M., Sivasankar C. Multi-objective-derived energy efficient routing in wireless sensor network using adaptive black hole-tuna swarm optimization strategy // *Ad Hoc Networks*. 2023. vol. 144. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103140.
25. Alfajeer A.A., Harous S. A review of routing protocols for underwater wireless sensor networks // *The 3rd International Conference on Distributed Sensing and Intelligent Systems (ICDSIS 2022)*. 2022. pp. 138–145. DOI: 10.1049/icp.2022.2428.
26. Shovon I.I., Shin S. Survey on Multi-Path Routing Protocols of Underwater Wireless Sensor Networks: Advancement and Applications. *Electronics*. 2022. vol. 11(21). DOI: 10.3390/electronics11213467.
27. Kebkal A., Kebkal K., Komar M. Data-link protocol for underwater acoustic networks // *Europe Oceans*. 2005. vol. 2. pp. 1174–1180. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1513225.
28. Stojanovic M. Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel // *Europe Oceans*. 2005. vol. 1. pp. 68–73 DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1511686.

29. Guqhaiman A.A., Akanbi O., Aljeadi A., Chow C.E. A Survey on MAC Protocol Approaches for Underwater Wireless Sensor Networks // *IEEE Sensors Journal*. 2021. vol. 21(3). pp. 3916–3932. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3024995.
30. Kulla E., Matsuo K., Barolli L. MAC Layer Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks: A Survey // *Lecture Notes in Network and Systems (LNNS)*. 2022. vol. 496. DOI: 10.1007/978-3-031-08819-3_21.
31. Gazi F., Ahmed N., Misra S., Wei W. Reinforcement Learning-Based MAC Protocol for Underwater Multimedia Sensor Networks // *CM Transactions on Sensor Networks*. 2022. vol. 18(3). pp. 1–25. DOI: 10.1145/3484201.
32. Liu X., Du X., Li M., Wang L., Li C. A MAC Protocol of Concurrent Scheduling Based on Spatial Temporal Uncertainty for Underwater Sensor Networks // *Hindawi Journal of Sensors*. 2021. vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/5558078.
33. Shahapur S.S., Khanai R. Underwater Sensor Network at physical, data link and network layer – a survey // *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*. 2015. pp. 1449–1453. DOI: 10.1109/ICCSP.2015.7322753.
34. Songzuo L., Iqbal B., Khan I.U., Ahmed N., Qiao G., Zhou F. Full Duplex Physical and MAC Layer-Based Underwater Wireless Communication Systems and Protocols: Opportunities, Challenges, and Future Directions // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. vol. 9(5). DOI: 10.3390/jmse9050468.
35. Casari P., Ardizzon F., Tomasin S. Physical Layer Authentication in Underwater Acoustic Networks with Mobile Devices // *WUWNet '22: Proceedings of the 16th International Conference on Underwater Networks & Systems*. 2022. pp. 1–8. DOI: 10.1145/3567600.3567604.
36. Kaveripakam S., Chinthaginjala R. Energy balanced reliable and effective clustering for underwater wireless sensor networks // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. vol. 77. pp. 41–62. DOI: 10.1016/j.aej.2023.06.083.
37. Zhou Z., Peng Z., Cui J., Jiang Z. Handling triple hidden terminal problems for multichannel MAC in long-delay underwater sensor networks // *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2012. vol. 11(1). pp. 139–154. DOI: 10.1109/TMC.2011.28.
38. Yahya A., Islam S.U., Zahid M., Ahmed G., Raza M., Pervaiz H. Cooperative routing for energy efficient underwater wireless sensor networks // *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 141888–141899. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2941422.
39. Rayen S.J., Arunajsmine J., Neelakandan S., Annamalai R. Social media networks owing to disruptions for effective learning // *Procedia Comput. Sci.* 2020. vol. 172. pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.022.
40. Li P., Wang S., Zhang H., Zhang E. Improved particle swarm optimization algorithm of clustering in underwater acoustic sensor networks // *Proceedings of the IEEE OCEANS*. 2017. pp. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084869.
41. Yu W., Chen Y., Wan L., Zhang X., Zhu P., Xu X. An energy optimization clustering scheme for multi-hop underwater acoustic cooperative sensor networks // *IEEE Access*. 2020. vol. 8. pp. 89171–89184. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993544.
42. Wang M., Chen Y., Sun X., Xiao F., Xu X. Node energy consumption balanced multi-hop transmission for underwater acoustic sensor networks based on clustering algorithm // *IEEE Access*. 2020. vol. 8. pp. 191231–191241. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032019.
43. Zhang W., Wang J., Han G. et al. A cluster sleep-wake scheduling algorithm based on 3D topology control in underwater sensor networks // *Sensors*. 2019. vol. 19. DOI: 10.3390/s19010156.
44. Vijayalakshmi S.R., Muruganand S. 6 Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) // *Wireless Sensor Network. Architecture – Applications – Advancements*. 2018. pp. 175–212 DOI: 10.1515/9781683923275-007.

45. Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2008. vol. 2008(10).
46. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische Mathematik*. 1959. vol. 1. pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
47. Ramaswami R., Parhi K. Distributed scheduling of broadcasts in a radio network // *Proceedings of the Eighth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM)*. 1989. vol. 2. pp. 497–504. DOI: 10.1109/INFCOM.1989.101493.
48. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice* // Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
49. Thorp W.H. Deep Sound attenuation in the sub and low kilocycle per-second range // *J. Acoust. Soc. Am.* 1965. vol. 38(4). p. 648–654.
50. Cui J.-H., Kong J., Gerla M., Zhou S. The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications // *IEEE Network*. 2006. vol. 20. no. 3. pp. 12–18. DOI: 10.1109/MNET.2006.1637927.
51. Tian K., Zhou C., Zhang J. Improved LEACH Protocol Based on Underwater Energy Propagation Model, Parallel Transmission, and Replication Computing for Underwater Acoustic Sensor Networks. *Sensors* // 2024. vol. 24(2). DOI: 10.3390/s24020556.
52. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Safronov K.S. et al. Energy-Efficient and Reliable Deployment Models for Hybrid Underwater Acoustic Sensor Networks with a Mobile Gateway // *J. Marine. Sci. Appl.* 2024. vol. 23. pp. 960–983. DOI: 10.1007/s11804-024-00444-z.
53. Федорова Т.А., Рыжов В.А., Сафронов К.С. Использование гибридной коммуникационной архитектуры подводной беспроводной сенсорной сети для повышения ее времени жизни и эффективности // *Информатика и автоматизация*. 2024. Т. 23 № 5. С. 1532–1570. DOI: 10.15622/ia.23.5.10.
54. Tian K., Zhou C., Zhang J. Improved LEACH Protocol Based on Underwater Energy Propagation Model, Parallel Transmission, and Replication Computing for Underwater Acoustic Sensor Networks // *Sensors*. 2024. vol. 24(2). DOI: 10.3390/s24020556.

Маевский Андрей Михайлович — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, отдел морской робототехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; научный сотрудник, «Научно-производственное предприятие подводных технологий «Океанос». Область научных интересов: системы управления, системы планирования движения, автономные объекты. Число научных публикаций — 30. Maevskiy_andrey@mail.ru; улица Лощманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(981)786-9879.

Рыжов Владимир Александрович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, подводная робототехника, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 130. varyzhov@smtu.ru; улица Лощманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(921)952-7719.

Федорова Татьяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры, кафедра прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: математическое моделирование, подводные беспроводные сенсорные сети, алгоритмы

планирования, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 35. fedorova.tan@gmail.com; улица Лоцманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(921)947-4797.

Печайко Иван Александрович — младший научный сотрудник, «Научно-производственное предприятие подводных технологий «Океанос». Область научных интересов: подводные роботы, алгоритмы планирования, манипуляционные системы, искусственный интеллект, симуляция подводных операций. Число научных публикаций — 8. pechaikojohn@gmail.com; Поэтический бульвар, 2, 194295, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(906)255-9933.

Буров Никита Михайлович — студент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Область научных интересов: алгоритмы автономного планирования, алгоритмы кластеризации. Число научных публикаций — 1. burov.nm@yandex.ru; ул. Большая Морская, 67, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(981)786-9879.

A. MAEVSKY, V. RYZHOV, T. FEDOROVA, I. PECHAIKO, N. BUROV
**STOCHASTIC DYNAMIC MODEL OF AN UNDERWATER
WIRELESS SENSOR NETWORK BASED ON A MODIFIED
LOUVAIN CLUSTERING ALGORITHM**

Maevsky A., Ryzhov V., Fedorova T., Pechaiko I., Burov N. Stochastic Dynamic Model of an Underwater Wireless Sensor Network Based on a Modified Louvain Clustering Algorithm.

Abstract. This paper presents an innovative approach to clustering and routing in Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs), based on a modified Louvain algorithm that considers sensor distances, the probability of successful message delivery, and the current energy levels of the nodes. The proposed method incorporates a dynamic reclustering mechanism driven by real-time monitoring of energy resources, allowing the network to adapt to environmental changes and sensor status by redistributing roles and restructuring clusters accordingly. The developed algorithm is designed to enhance energy efficiency, minimize data loss, and reduce the number of retransmissions in the context of limited bandwidth in underwater acoustic communication channels. A TDMA-based MAC protocol is also implemented to prevent collisions by assigning independent time slots to sensors, thereby eliminating interference. The approach addresses key resource management challenges in UWSNs by reducing energy consumption, improving data delivery reliability, shortening overall message transmission time, and extending the network's autonomous operation. The model takes into account the three-dimensional spatial deployment of sensors and optimizes the placement of reference nodes to avoid bottlenecks and excessive energy drain. The primary goal of the study is to construct a network topology that minimizes energy costs and message loss while ensuring efficient routing of data to reference nodes and onward to a mobile sink. The flexibility and adaptability of the proposed solution make it well-suited for real-world underwater applications such as environmental monitoring and ocean exploration.

Keywords: underwater wireless sensor networks, clustering algorithms, Louvain algorithm.

References

1. Zorzi M., Casari P., Baldo N., Harris A.F. Energy-efficient routing schemes for underwater acoustic networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2008. vol. 26. no. 9. pp. 1754–1766.
2. Davis A., Chang H. Underwater wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE Oceans.* 2012. pp. 1–5.
3. Freitag L., Grund M., Singh S., Partan J., Koski P., Ball K. The WHOI micro-modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms. *Proceedings Oceans MTS/IEEE.* 2005. vol. 2. pp. 1086–1092.
4. Rahman M.A., Lee Y., Koo I. EECOR: an energy efficient cooperative opportunistic routing protocol for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Access.* 2017. vol. 5. pp. 14119–14132. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2730233.
5. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Netw.* 2005. vol. 3(3). pp. 257–279. DOI: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
6. Pompili D., Melodia T., Akyildiz I.F. Distributed routing algorithms for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2010. vol. 9. no. 9. pp. 2934–2944. DOI: 10.1109/TWC.2010.070910.100145.

7. Lu Q., Liu F., Zhang Y., Jiang S. Routing Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks: A Survey from an Application Perspective. *Advances in Underwater Acoustics*. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68900.
8. Azam I., Majid A., Khan T., et al. Avoiding Energy Holes in Underwater Wireless Sensor Networks with Balanced Load Distribution. *10th International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive System (CISIS)*. 2016. pp. 341–350. DOI: 10.1109/CISIS.2016.109.
9. Chaaf A., Muthanna M.S.A., Muthanna A., et al. Energy-Efficient Relay-Based Void Hole Prevention and Repair in Clustered Multi-AUV Underwater Wireless Sensor Network. *Security and Communication Networks*. 2021. vol. 2021. no. 1. DOI: 10.1155/2021/9969605.
10. Khan Z.A., Karim O.A., Abbas S., Javaid N., Zikria Y.B., Tariq U. Q-learning based energy-efficient and void avoidance routing protocol for underwater acoustic sensor networks. *Computer Networks*. 2021. vol. 197. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.10839.
11. Mhemed R., Phillips W., Comeau F., Aslam N. Void avoiding opportunistic routing protocols for underwater wireless sensor networks: A survey. *Sensors*. 2022. vol. 22(23). DOI: 10.3390/s22239525.
12. Tokmachev D.A., Chensky A.G., Zolotarev N.S., Poletaev A.S. Modelling of a hydroacoustic modem for underwater communications. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. vol. 1728. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012021.
13. Chen H., Zhu Y., Zhang W., Wu K., Yuan F. Underwater Acoustic Micromodem for Underwater Internet of Things. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. vol. 2022. no. 1. DOI: 10.1155/2022/9148756.
14. Sherlock B., Morozs N., Neasham J., Mitchell P. Ultra-low cost and ultra-low-power, miniature acoustic modems using multipath tolerant spread spectrum techniques. *Electronics*. 2022. vol. 11. no. 9. DOI: 10.3390/electronics11091446.
15. Li J., Tong F., Jiang W., Roy S. Underwater acoustic modem with high precision ranging capability based on second-level cesium atomic clock. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022. vol. XLVI-3/W1-2022. pp. 75–80, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-75-2022.
16. Zia I., Poncela J., Otero P. State-of-the-Art Underwater Acoustic Communication Modems: Classifications, Analyses and Design Challenges. *Wireless Personal Communications*. 2021. vol. 116. pp. 1325–1360. DOI: 10.1007/s11277-020-07431-x.
17. Datta A., Dasgupta M. Energy efficient topology control in underwater wireless sensor Networks. *Computers and Electrical Engineering*. 2023. vol. 105. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108485.
18. Sutagundar A.V., Halakarnimath B.S., Bhadjantri L.B. et al. A Novel Approach of topology control in underwater sensor networks. *IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*. 2022. pp. 1–5. DOI: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972400.
19. Choudhary M., Goyal N. Dynamic topology control algorithm for node deployment in mobile underwater wireless sensor networks. *Concurrency and Computation Practice and Experience*. 2022. vol. 34(15). DOI: 10.1002/cpe.6942.
20. Hu Y., Hu K., Liu H. et al. An energy-balanced head nodes selection scheme for underwater mobile sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2022. no. 63. DOI: 10.1186/s13638-022-02141-3.
21. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Semenov N.N. and Sulaiman Sh.A. Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway. *Journal of Marine Science and Application*. 2022. vol. 21. pp. 179–196. DOI: 10.1007/s11804-022-00268-9.

22. Ahmad I., Rahman T., Zeb A., et al. Cooperative Energy-Efficient Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2022. vol. 22. DOI: 10.3390/s22186945.
23. Bharny S., Sharma S., Alsharabi N., Eldin E.T., Ghamry N.A. Energy-efficient clustering protocol for underwater wireless sensor networks using optimized glowworm swarm optimization. *Front. Mar. Sci.* 2023. vol. 10. DOI: 10.3389/fmars.2023.1117787.
24. Sheeja R., Iqbal M.M., Sivasankar C. Multi-objective-derived energy efficient routing in wireless sensor network using adaptive black hole-tuna swarm optimization strategy. *Ad Hoc Networks*. 2023. vol. 144. DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103140.
25. Alfajeer A.A., Harous S. A review of routing protocols for underwater wireless sensor networks. The 3rd International Conference on Distributed Sensing and Intelligent Systems (ICDISIS 2022). 2022. pp. 138–145. DOI: 10.1049/icp.2022.2428.
26. Shovon I.I., Shin S. Survey on Multi-Path Routing Protocols of Underwater Wireless Sensor Networks: Advancement and Applications. *Electronics*. 2022. vol. 11(21). DOI: 10.3390/electronics11213467.
27. Kebkal A., Kebkal K., Komar M. Data-link protocol for underwater acoustic networks. *Europe Oceans*. 2005. vol. 2. pp. 1174–1180. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1513225.
28. Stojanovic M. Optimization of a data link protocol for an underwater acoustic channel. *Europe Oceans*. 2005. vol. 1. pp. 68–73. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1511686.
29. Guqhaiman A.A., Akanbi O., Aljeadi A., Chow C.E. A Survey on MAC Protocol Approaches for Underwater Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*. 2021. vol. 21(3). pp. 3916–3932. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3024995.
30. Kulla E., Matsuo K., Barolli L. MAC Layer Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks: A Survey. *Lecture Notes in Network and Systems (LNNS)*. 2022. vol. 496. DOI: 10.1007/978-3-031-08819-3_21.
31. Gazi F., Ahmed N., Misra S., Wei W. Reinforcement Learning-Based MAC Protocol for Underwater Multimedia Sensor Networks. *CM Transactions on Sensor Networks*. 2022. vol. 18(3). pp. 1–25. DOI: 10.1145/3484201.
32. Liu X., Du X., Li M., Wang L., Li C. A MAC Protocol of Concurrent Scheduling Based on Spatial Temporal Uncertainty for Underwater Sensor Networks. *Hindawi Journal of Sensors*. 2021. vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/5558078.
33. Shahapur S.S., Khanai R. Underwater Sensor Network at physical, data link and network layer – a survey. *International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*. 2015. pp. 1449–1453. DOI: 10.1109/ICCSP.2015.7322753.
34. Songzuo L., Iqbal B., Khan I.U., Ahmed N., Qiao G., Zhou F. Full Duplex Physical and MAC Layer-Based Underwater Wireless Communication Systems and Protocols: Opportunities, Challenges, and Future Directions. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. vol. 9(5). DOI: 10.3390/jmse9050468.
35. Casari P., Ardizzon F., Tomasin S. Physical Layer Authentication in Underwater Acoustic Networks with Mobile Devices. *WUWNet '22: Proceedings of the 16th International Conference on Underwater Networks & Systems*. 2022. pp. 1–8. DOI: 10.1145/3567600.3567604.
36. Kaveripakam S., Chinthajinjala R. Energy balanced reliable and effective clustering for underwater wireless sensor networks. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. vol. 77. pp. 41–62. DOI: 10.1016/j.aej.2023.06.083.
37. Zhou Z., Peng Z., Cui J., Jiang Z. Handling triple hidden terminal problems for multichannel MAC in long-delay underwater sensor networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2012. vol. 11(1). pp. 139–154. DOI: 10.1109/TMC.2011.28.

38. Yahya A., Islam S.U., Zahid M., Ahmed G., Raza M., Pervaiz H. Cooperative routing for energy efficient underwater wireless sensor networks. IEEE Access. 2019. vol. 7. pp. 141888–141899. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2941422.
39. Rayen S.J., Arunajsmine J., Neelakandan S., Annamalai R. Social media networks owing to disruptions for effective learning. Procedia Comput. Sci. 2020. vol. 172. pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.022.
40. Li P., Wang S., Zhang H., Zhang E. Improved particle swarm optimization algorithm of clustering in underwater acoustic sensor networks. Proceedings of the IEEE OCEANS. 2017. pp. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084869.
41. Yu W., Chen Y., Wan L., Zhang X., Zhu P., Xu X. An energy optimization clustering scheme for multi-hop underwater acoustic cooperative sensor networks. IEEE Access. 2020. vol. 8. pp. 89171–89184. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993544.
42. Wang M., Chen Y., Sun X., Xiao F., Xu X. Node energy consumption balanced multi-hop transmission for underwater acoustic sensor networks based on clustering algorithm. IEEE Access. 2020. vol. 8. pp. 191231–191241. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032019.
43. Zhang W., Wang J., Han G. et al. A cluster sleep-wake scheduling algorithm based on 3D topology control in underwater sensor networks. Sensors. 2019. vol. 19. DOI: 10.3390/s19010156.
44. Vijayalakshmi S.R., Muruganand S. 6 Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs). Wireless Sensor Network. Architecture – Applications – Advancements. 2018. pp. 175–212 DOI: 10.1515/9781683923275-007.
45. Blondel V.D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2008. vol. 2008(10).
46. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik. 1959. vol. 1. pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
47. Ramaswami R., Parhi K. Distributed scheduling of broadcasts in a radio network. Proceedings of the Eighth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM). 1989. vol. 2. pp. 497–504. DOI: 10.1109/INFCOM.1989.101493.
48. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
49. Thorp W.H. Deep Sound attenuation in the sub and low kilocycle per-second range. J. Acoust. Soc. Am. 1965. vol. 38(4). p. 648–654.
50. Cui J.-H., Kong J., Gerla M., Zhou S. The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications. IEEE Network. 2006. vol. 20. no. 3. pp. 12–18. DOI: 10.1109/MNET.2006.1637927.
51. Tian K., Zhou C., Zhang J. Improved LEACH Protocol Based on Underwater Energy Propagation Model, Parallel Transmission, and Replication Computing for Underwater Acoustic Sensor Networks. Sensors. 2024. vol. 24(2). DOI: 10.3390/s24020556.
52. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Safronov K.S. et al. Energy-Efficient and Reliable Deployment Models for Hybrid Underwater Acoustic Sensor Networks with a Mobile Gateway. J. Marine. Sci. Appl. 2024. vol. 23. pp. 960–983. DOI: 10.1007/s11804-024-00444-z.
53. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Safronov K.S. [Using Hybrid Communication Architecture of Underwater Wireless Sensor Network to Improve Its Lifetime and Efficiency]. Informatics and Automation. 2024. no. 23(5). pp. 1532–1570. DOI: 10.15622/ia.23.5.10. (In Russ.).
54. Tian K., Zhou C., Zhang J. Improved LEACH Protocol Based on Underwater Energy Propagation Model, Parallel Transmission, and Replication Computing for

Maevsky Andrey — Ph.D., Deputy head of the department, Marine robotics department, Saint Petersburg State Marine Technical University; Researcher, Research and Production Enterprise for Underwater Technologies «Okeanos». Research interests: control systems, motion planning systems, autonomous systems. The number of publications — 30. Maevskiy_andrey@mail.ru; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(981)786-9879.

Ryzhov Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of the department, Department of applied mathematics and mathematical modeling, Saint Petersburg State Marine Technical University. Research interests: mathematical modeling, underwater robotics, artificial intelligence. The number of publications — 130. varyzhov@smtu.ru; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(921)952-7719.

Fedorova Tatyana — Ph.D., Associate professor, Department of applied mathematics and mathematical modeling, Saint Petersburg State Marine Technical University. Research interests: mathematical modeling, underwater wireless sensor networks, path planning algorithms, artificial intelligence. The number of publications — 35. fedorova.tan@gmail.com; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(921)947-4797.

Pechaiko Ivan — Junior researcher, Research and Production Enterprise for Underwater Technologies «Okeanos». Research interests: underwater robots, path planning algorithms, manipulation systems, artificial intelligence, simulation of underwater operations. The number of publications — 8. pechaikojohn@gmail.com; 2, Poeticheskoy Av., 194295, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(906)255-9933.

Burov Nikita — Student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI). Research interests: autonomous planning algorithms, clustering algorithms. The number of publications — 1. burov.nm@yandex.ru; 67, Bolshaya Morskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(981)786-9879.