

12. Daah C., Qureshi A., Awan I., Konur S. Enhancing Zero Trust Models in the Financial Industry through Blockchain Integration: A Proposed Framework, *Electronics*, 2024, Vol. 13, 865, 49 p. DOI: 10.3390/electronics13050865.
13. Fernandez E.B., Brazhuk A. A critical analysis of Zero Trust Architecture (ZTA), *Computer Standards & Interfaces*, 2024, Vol. 89, 103832, 12 p. DOI: 10.1016/j.csi.2024.103832.
14. Poltavseva M.A., Platonov V.V., Semyanov P.V. Secure data processing architectures in big data systems. December 16-17, 2024, 2024, pp. 104-108.
15. Zhao Y. et al. A zone-based data lake architecture for IoT, small and big data, *Proceedings of the 25th International Database Engineering & Applications Symposium*, 2021, pp. 94-102.
16. Awaysheh F.M. et al. Security by design for big data frameworks over cloud computing, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2021, Vol. 69, No. 6, pp. 3676-3693.
17. Roy P., Kumar R. Multilevel Security Framework based on An Onion Encryption in Public Cloud Network, *2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*. IEEE, 2021, pp. 1442-1446.
18. Kuhn C. et al. Onion routing with replies, *Advances in Cryptology-ASIACRYPT 2021: 27th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security, Singapore, December 6-10, 2021, Proceedings, Part II 27*. Springer International Publishing, 2021, pp. 573-604.
19. Thirumalaisamy M. et al. Interaction of secure cloud network and crowd computing for smart city data obfuscation, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 19, Art. 7169.
20. Poltavseva, M.A., Kalinin M.O., Zegzhda D.P. Modelirovanie dannykh v zadachakh informatsionnoy bezopasnosti polikhranilishch [Data modeling in problems of information security of polystorage facilities], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems], 2023, No. 4 (57), pp. 122-132. DOI: 10.48612/jisp/x468-hp82-adav.
21. Duncan G. and Stokes L. Data masking for disclosure limitation, *WIREs Comp Stat.*, 2009, Vol. 1, pp. 83-92. DOI: 10.1002/wics.3.
22. Jain R.B., Puri M. An approach towards the development of scalable data masking for preserving privacy of sensitive business data, *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems*. Springer Singapore, 2020, Vol. 1056, pp. 733-743. DOI: 10.1007/978-981-15-0199-9.

Полтавцева Мария Анатольевна – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; e-mail: poltavtseva@ibks.spbstu.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125527632; д.т.н.; доцент; профессор института кибербезопасности и защиты информации; ORCID 0000-0001-9659-1244.

Иванов Денис Вадимович – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; e-mail: vanov@ibks.spbstu.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125527632; к.т.н.; доцент института кибербезопасности и защиты информации; ORCID 0009-0008-7331-9721.

Poltavtseva Maria Anatolyevna – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; e-mail: poltavtseva@ibks.spbstu.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +78125527632; dr. of eng. sc.; associate professor; professor at the Institute of Cyber Security and Information Protection; ORCID 0000-0001-9659-1244.

Ivanov Denis Vadimovich – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; e-mail: vanov@ibks.spbstu.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +78125527632; cand. of eng. sc.; associate professor at the Institute of Cyber Security and Information Protection; ORCID 0009-0008-7331-9721.

УДК 004.7

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-62-81

А.М. Маевский, В.А. Рыжов, Т.А. Федорова, И.В. Кожемякин, Н.М. Буров

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

Подводные беспроводные сенсорные сети (ПБСС) играют важную роль в мониторинге океанических процессов, подводной навигации, экологическом контроле и обеспечении безопасности. Однако особенности подводной среды, такие как высокая затухаемость сигналов, ограниченные ресурсы энергии и изменяющаяся топология сети, создают значительные сложности в организации эффективной передачи данных. Для оптимизации работы сети и продления ее срока службы используется метод кластеризации, позволяющий группировать узлы, снижать нагрузку

на коммуникационные каналы и повышать энергоэффективность. Однако в условиях выхода из строя узлов сети статическая кластеризация становится неэффективной, что требует внедрения динамической рекластеризации. Процедура перераспределения ролей узлов и перестройки топологии сети позволяет сохранять устойчивость связи и минимизировать потери данных, учитывая энергетически баланс всей сети в целом. В данной работе исследуются современные подходы к кластеризации и рекластеризации в ПБСС с учетом энергетического баланса, вероятности отказов узлов и помех в среде передачи. Развитие адаптивных методов управления ПБСС является актуальной задачей, направленной на повышение надежности, энергоэффективности и долговечности подводных сетей связи. В статье представлена стохастическая кроссуровневая модель для динамических трехмерных ПБСС произвольной топологии. Модель использует: новую технику кластеризации/рекластеризации базирующуюся на лувенском алгоритме, протокол маршрутизации, построенный на методе Дейкстра и метод управления доступом к среде на основе расписания передач (TDMA). Предложенная модель функционирования ПБСС положена в основу разработанного имитационного комплекса, позволяющего проводить оценку эффективности и надежности сети с учетом нарушения связности и уязвимостей для ПБСС различного масштаба и назначения. В рамках исследований выполнен параметрический анализ систематических расчетов функциональных характеристик ПБСС. Результаты анализа показали, что предложенная имитационная модель обеспечивает увеличение времени автономной работы сети и снижение числа потерянных сообщений по сравнению с моделями других авторов.

Подводные беспроводные сенсорные сети; стохастическая динамическая модель сети; имитационное моделирование; кластеризация; лувенский алгоритм; метод Дейкстра; метод управления доступом к среде на основе расписания передач.

A.M. Maevskij, V.A. Ryzhov, T.A. Fedorova, I.V. Kozhemyakin, N.M. Burov

STOCHASTIC DYNAMIC MODEL OF UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORK BASED ON LOUVAIN CLUSTERING ALGORITHM

Underwater wireless sensor networks (UWSNs) play an important role in monitoring ocean processes, underwater navigation, environmental control and security. However, underwater environment features such as high signal attenuation, limited energy resources and changing network topology create significant challenges in organizing efficient data transmission. To optimize network operation and extend its service life, a clustering method is used to group nodes, reduce the load on communication channels and improve energy efficiency. However, in the event of network node failure, static clustering becomes ineffective, which requires the implementation of dynamic reclustering. The procedure of redistributing node roles and rebuilding the network topology allows maintaining communication stability and minimizing data losses, taking into account the energy balance of the entire network as a whole. This paper examines modern approaches to clustering and reclustering in UWSNs taking into account the energy balance, node failure probability and interference in the transmission medium. The development of adaptive UWSN control methods is an urgent task aimed at increasing the reliability, energy efficiency and durability of underwater communication networks. The article presents a stochastic cross-level model for dynamic three-dimensional PBSNs of arbitrary topology. The model uses a new clustering/reclustering technique based on the Louvain algorithm, a routing protocol built on the Dijkstra method, and a time-domain management (TDMA) method. The proposed PBSN operating model is the basis for the developed simulation complex, which allows assessing the efficiency and reliability of the network, taking into account the loss of connectivity and vulnerabilities for PBSNs of various scales and purposes. As part of the research, a parametric analysis of systematic calculations of the PBSN functional characteristics was performed. The results of the analysis showed that the proposed simulation model provides an increase in the autonomous network operation time and a decrease in the number of lost messages compared to the models of other authors.

Underwater wireless sensor networks; stochastic dynamic network model; simulation modeling; clustering; Louvain algorithm; Dijkstra's method; medium access control method based on the transmission schedule.

Введение. Акустические подводные беспроводные сенсорные сети (ПБСС) находят широкое применение в различных областях морской деятельности включая экологический мониторинг, разведку полезных ископаемых, управление подводными объектами и системами, распределенное тактическое наблюдение [1–3]. Однако создание и эксплуатация подобных сетей сопряжены с рядом технических и фундаментальных научных

проблем, связанных со сложностью передачи данных в динамически изменяющейся подводной среде. Для решения этих проблем требуется разработка специализированных алгоритмов и методов, обеспечивающих надежное и энергоэффективное функционирование проектируемых ПБСС.

Существует большое число исследований и обзоров, посвященных разработке протоколов системных уровней модели OSI для акустических подводных беспроводных сенсорных сетей. Целью этих работ являлось достижение лучших функциональных характеристик ПБСС, полученных по критериям энергоэффективности, надежности и производительности. Для достижения оптимальных результатов рассматривались решения задач, связанных с: контролем топологии сети [4–6], использованием мобильных узлов [4, 6–8], разработкой энергоэффективных протоколов маршрутизации/алгоритмов кластеризации [9–13], разработкой протоколов доступа к среде [14–17], оптимизацией протоколов канального уровня [18–22], модернизацией протоколов физического уровня (методов формирования и обработки сигнала) [23]. В рамках перечисленных направлений работ были получены результаты, показывающие определенный прогресс в решении проблем, ограничивающих возможности акустических ПБСС. Наряду с этим было отмечено, что рассматриваемая задача является многопараметрической и многокритериальной и требует комплексного решения. В настоящее время одновременный корректный учет большого числа взаимосвязанных параметров, ограничений и требований остается не реализованным; отмечается, что универсальных протоколов равноэффективных для различных практических приложений пока создать не удается.

Предлагаемая работа авторов нацелена на разработку комплексной стохастической модели функционирования ПБСС, учитывающей достаточно широкий набор проектных параметров и использующей в качестве целевой функции универсальную метрику сети, зависящую как от технических характеристик, топологии сети и физических параметров среды в акватории, так и от динамических особенностей функционирования всей сети в целом, в частности, от выбранных протоколов или динамической перестройки маршрутов.

Ранее авторами рассматривалось сравнение функциональных характеристик стационарной и гибридной архитектур ПБСС, включая анализ энергетических затрат, времени жизни узлов и влияния мобильных элементов на качество связи [16, 17]. С использованием аналитического вероятностного подхода было исследовано влияние проектных параметров (масштаба сети, размещения узлов, технических характеристик передающих и принимающих устройств) на основные функциональные характеристики сети. Было показано, что гибридные решения с мобильными шлюзами (например, волновыми глайдерами) повышают энергоэффективность, связность и надежность сетей [18].

В развитие выполненных исследований, в настоящей работе представлен имитационный подход, позволяющий моделировать функциональность динамических трехмерных гибридных акустических ПБСС произвольной топологии. Для управления функциями физического уровня, канала передачи данных, сетевого уровня в настоящей работе используется межуровневая архитектура платформы имитационного моделирования, основанная на технологии системных уровней модели OSI. Авторами предлагается новая реализация протоколов сетевого уровня (кластеризации и маршрутизации), основанная на применении лувенского алгоритма [19] и метода Дейкстры. Такой подход позволяет динамически адаптировать топологию сети к изменениям как в океанографической обстановке, так и в энергетическом балансе сети, что обеспечивает более равномерное распределение нагрузки по сети и увеличивает продолжительность ее жизни. Разработанный авторами алгоритм реализует динамическую рекластеризацию на основе мониторинга уровня энергии узлов сети, что позволяет динамически перераспределять роли между сенсорами, а также минимизировать число ретрансляций при передаче сообщений (для достижения необходимой надежности). На уровне канала передачи данных в предложенной модели используется метод управления доступом к среде основанный на расписании передач (TDMA).

Сравнение результатов имитационного моделирования, полученных с использованием разработанной стохастической динамической модели, с результатами моделей, базирующихся на протоколах LEACH, UCUBG, DBR, NUC-EB [22] PPWURC [23]; показало, что предложенная авторами модель для определенных режимов обеспечивает достижение лучших функциональных характеристик для рассмотренных вариантов топологий ПБСС.

Формальная постановка задачи. В работе исследуется задача разработки и оптимизации топологии 3D ПБСС для мониторинга заданной акватории.

Предполагается, что гибридная ПБСС расположена в акватории в физически неоднородной среде и состоит из произвольной трехмерной сетки сенсоров, обыкновенных и референсных и мобильного шлюза, роль которого может выполнять либо волновой глайдер (ВГ), либо иной автономный мобильный шлюз.

Вся система разбита на кластеры, в каждом кластере есть свой, локализованный определенным образом референсный узел, к которому стекается информация от обыкновенных узлов, расположенных в данном кластере. Задачей обыкновенных сенсоров является измерение некоторого набора физических параметров окружающей среды, обработка этих данных и передача напрямую или через цепочку соседей этой информации на свой референсный узел. Обыкновенные агенты сначала передают сообщения референсным агентам своего кластера, а затем референсные агенты передают сообщения вверх, на мобильный шлюз.

Формально поставленную задачу можно описать следующим набором параметров:

- ◆ Акватория: задана площадь $S = n \times n$ (в планарной проекции) с глубиной h , где сенсоры распределены равномерно или по заданной схеме, определяемой особенностями мониторинга акватории. Например, распределение может учитывать градиенты температуры, солёности или морфологию морского дна.

- ◆ Подводная беспроводная сенсорная сеть включает множество из N сенсоров $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$, где каждый сенсор b обладает следующими характеристиками:

1. Координаты сенсора в пространстве $\vec{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$, где x_i, y_i задают планарное положение, а z_i – глубину размещения. На первом этапе формируется начальная топология сети, которая определяется массивом координат всех сенсоров \vec{x}_i . Распределение узлов может быть равномерным или следовать заданной модели. Все сенсоры разделяются на набор кластеров, каждый из которых состоит из группы узлов, связанных друг с другом. В рамках кластера информация передаётся к центральному референсному узлу и далее на мобильный шлюз.

2. Технические параметры модема, такие как мощность модема P_{bi} , несущая частота f и полоса пропускания Δf . Эти характеристики используются в модели среды, позволяя рассчитать вероятность успешной доставки сообщения вдоль заданного ребра, соединяющего два сенсора. Разработанный имитационный комплекс позволяет использовать и другие технические параметры, такие как характеристики (например, направленность) антенны. В предлагаемой модели антенна считается ненаправленной.

3. Энергетическое состояние E_i сенсора: уровень оставшейся энергии сенсора, уменьшающийся при каждой передаче, приёме сообщений и в режиме ожидания.

Коммуникационная модель предполагает, что сенсоры обмениваются сообщениями, причем вероятность успешной передачи $p(b_i, b_j) = p(r_{ij})$ между двумя сенсорами b_i и b_j определяется в физической модели среды и зависит от:

- ◆ расстояния $r(b_i, b_j) = r_{ij}$ между сенсорами;
- ◆ технических характеристик модема, перечисленных выше;
- ◆ параметров среды, так что в модели среды может быть учтено затухание сигнала, эффекты многолучевого распространения, шумовые помехи и другие физические характеристики океана.

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.

Топология: на начальном этапе формируется топология сети (массив координат в пространстве) на основе выбранной модели распределения.

Система моделирования поддерживает несколько различных моделей распределения сенсоров в пространстве:

Random (случайное распределение), рис. 1,а:

$$\vec{x}_i = (x_i, y_i, z_i), \quad x_i, y_i \sim U(0, n), \quad z_i = z_0$$

Regular (регулярная решётка), рис. 1.б:

$$x_i = i \cdot \text{step}, \quad y_j = j \cdot \text{step}, \quad z = z_0$$

Fluctuation Regular (регулярная решётка с отклонением), рис.1.в:

$$x_i = i \cdot s + \epsilon_x, \quad y_j = j \cdot s + \epsilon_y, \quad \epsilon_x, \epsilon_y \sim U(-\Delta, \Delta), \quad z = z_0,$$

где $-\Delta$ задаёт амплитуду отклонений.

Pseudo Random (псевдослучайное распределение). Используется последовательность Халтона [31], рис.1.г:

$$(x_i, y_i) = a \text{ lton}(b_1, b_2, i),$$

где b_1, b_2, i – взаимно простые основания последовательности Халтона, i – индекс сенсора.

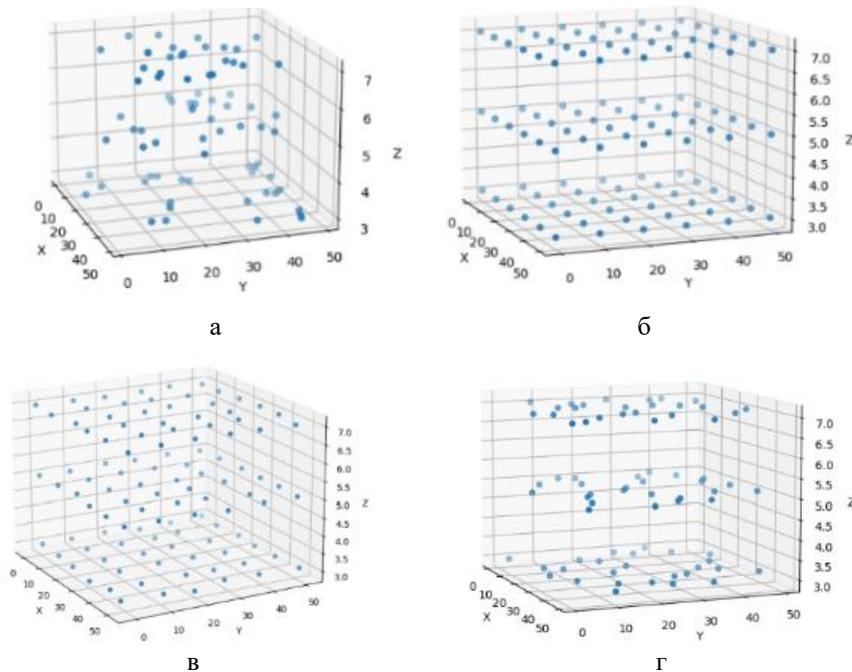


Рис. 1. Модели распределения сенсоров в акватории

Данный выбор топологий обоснован в первую очередь учетом особенностей реальной эксплуатации сети, где объекты не могут располагаться в точно заданных позициях.

Физическая модель. Известно, что одним из критериев производительности цифровых систем связи является зависимость вероятности появления ошибочного бита от отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит – e_b , к спектральной плотности мощности аддитивного белого гауссовского шума – N_0 . Это отношение e_b/N_0 определяется через среднюю мощность сигнала P_s и среднюю мощность шума P_n следующим образом [24]:

$$\frac{e_b}{N_0} = \frac{P_s}{P_n} \frac{B}{f_{bit}}, \quad (1)$$

где B – ширина полосы пропускания, f_{bit} – битовая скорость передачи информации.

Потери при распространении акустического сигнала частотой f на расстояние r от источника в простейшем случае могут быть определены как

$$A(r, f) = r^s a(f)^r,$$

где степень $s = 2$ для сферической волны и $s = 1$ для цилиндрической. Считая, что распространение происходит на глубокой воде и расширение фронта волны является сферическим, возьмем $s = 2$, $a(f)$ – связан с коэффициентом затухания сигнала выраженном в дБ/км по формуле

$$10 \log_{10} a(f) = \beta(f).$$

В пределах заданной акватории будем считать, что температура, соленость и кислотность постоянны, тогда коэффициент затухания $\beta(f)$ при заданной частоте звуковых колебаний f используется аппроксимированная формула Торпа с учётом данных для частот 0,1 - 100 кГц. [25]:

$$\beta(f) = \frac{0.1 \cdot f^2}{1 + f^2} + \frac{40 \cdot f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0.0003. \quad (2)$$

Отношение сигнал/шум на расстоянии r от передатчика обозначим $\Gamma(r)$ и определим через нормированное отношение сигнал/шум и потери при распространении сигнала как

$$\Gamma(r) = \frac{e_b}{N_0 A(r, f)} = \frac{e_b}{N_0 r^2 a(f)^r}.$$

В подводном канале с рэлеевским замиранием скорость возникновения битовой ошибки (BER) для двоичной фазовой модуляции BPSK может быть вычислена как [26]:

$$q_e(r) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\Gamma(r)}{1 + \Gamma(r)}} \right) = BER. \quad (3)$$

Тогда для пакета длиной N_{bit} вероятность успешной передачи на расстояние r будет равна

$$p(r) = (1 - q_e(r))^{N_{bit}}. \quad (4)$$

Проектные параметры моделирования функциональных характеристик ПБСС.

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

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.

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 посылки 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.

Формулы (1)- (4) используются для проектирования и оптимизации подводных беспроводных сенсорных сетей (ПБСС) в разработанном имитационном комплексе. На их основе можно определить:

- ♦ оптимальную несущую частоту передачи сигнала f для минимизации затухания;
- ♦ максимально допустимое расстояние r между узлами, обеспечивающее требуемую надежность работы сети (определяемое процентом успешно доставленных сообщений);
- ♦ вероятность успешной передачи данных для различных физических условий канала. Эти факторы непосредственно влияют на эффективность и надежность сети.

Алгоритм работы сети с использованием Лувенского метода. Алгоритм работы сети может быть описан последовательностью шагов, представленных на рис. 2.

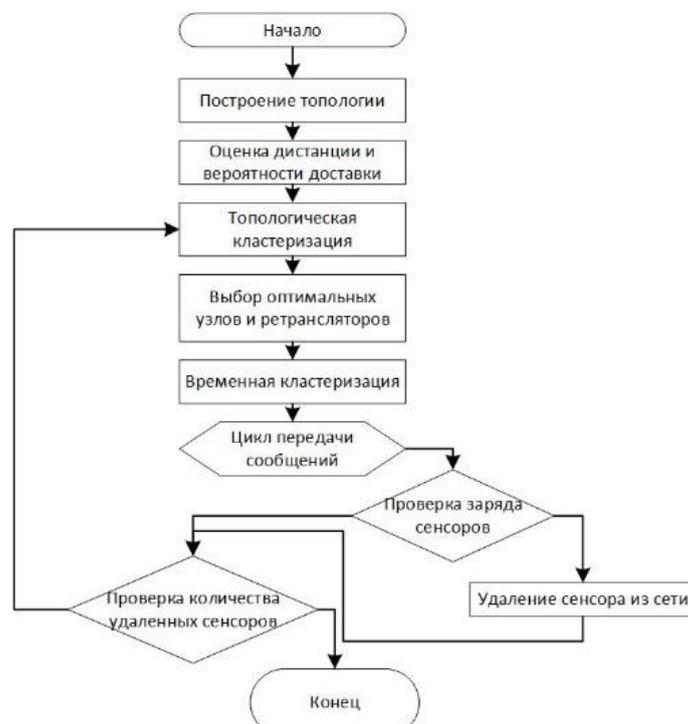


Рис. 2. Блок-схема работы Лувенского алгоритма

Далее более детально рассмотрим основные шаги представленного алгоритма.

Метод построения топологии ПБСС. Топология связей задаётся квадратной матрицей смежности (или матрицей связей), обозначаемой как $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, N$. Элементы этой матрицы a_{ij} указывают на существование связи между узлами b_i и b_j и принимают значения:

- ◆ $a_{ij} = 1$ означает, что между узлами b_i и b_j существует связь;
- ◆ $a_{ij} = 0$ означает, что связи между узлами i и j нет.

Матрицы смежности являются важным инструментом в анализе сетей, так как они предоставляют компактное и структурированное представление связей между узлами. В контексте оптимизации коммуникации в сетях, таких как сенсорные сети или мультиагентные системы, матрицы смежности играют ключевую роль, обеспечивая эффективные вычисления для маршрутизации, кластеризации и управления ресурсами.

Кроме матрицы смежности введем весовую матрицу W с элементами $w_{ij} = p(r_{ij})$, для всех узлов сети.

В основе алгоритма лежит оптимизация коэффициента модулярности M 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.

В контексте ПБСС модулярность M используется для создания энергоэффективной топологии. Сеть делится на группы сенсоров (кластеры), в которых узлы тесно связаны друг с другом и оптимально передают данные через центральные узлы (референсные сенсоры). Высокая модулярность помогает минимизировать энергопотребление: класте-

ризация 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.

Значение коэффициента модулярности M рассчитывается как:

$$M = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[a_{ij} w_{i,j} - \frac{w_i w_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (5)$$

где

a_{ij} – элемент матрицы смежности равный 1 или 0 на данной итерации;

$w_{i,j}$ – вес ребра между вершинами i и j , которые могут объединиться в кластер;

w_i и w_j – сумма весов ребер i и j , инцидентных вершинам i и j , на которых элементы матрицы смежности равны 1 на данной итерации, так что имеют место формулы

$$\sum_k w_{jk} a_{ij} = w_j \text{ и } \sum_l w_{il} a_{ij} = w_i,$$

где вершины k и l – это все узлы сети, связанные с i и j соответственно;

m – общее количество ребер в сети,

$\frac{w_i w_j}{2m}$ – средневзвешенная вероятность передачи сигнала от узлов i и j по всей сети;

Разность $\left[a_{ij} w_{i,j} - \frac{w_i w_j}{2m} \right]$ 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 эта разность положительна, и узлы имеет смысл сгруппировать в один кластер. Если эта разность отрицательна, то скорее всего узлы должны принадлежать разным кластерам.

$\delta(c_i, c_j)$ – индикатор принадлежности узлов i и j к одному кластеру.

Коэффициент модулярности отдельного кластера определяется как:

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^c}{2m} \{c_i = c_j = c\} - \left(\frac{\sum_{i=1}^k (w_i^c + w_i^{c'})}{2m} \{c_i = c\} \right)^2 = \frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2, \quad (6)$$

где M_c – модулярность кластера;

w_i^c – вес внутрикластерного ребра;

$\sum_{i=1}^n w_i^c = \Sigma_{in}$ – сумма весов ребер между узлами внутри сообщества c (каждое ребро учитывается дважды). Увеличение Σ_{in} приводит к повышению модулярности, так как узлы становятся более "связанными" в рамках кластера;

$w_i^{c'}$ – вес межкластерного ребра;

$\sum_{i=1}^k (w_i^c + w_i^{c'}) = \Sigma_{tot}$ – сумма всех весов ребер для узлов внутри сообщества (включая ребра, соединяющие узлы сообщества с узлами за его пределами). Чем меньше Σ_{tot} , тем меньше "утечек" связей за пределы кластера, что также повышает модулярность.

n – число внутрикластерных ребер;

k – общее число ребер, инцидентных всем вершинам кластера.

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

$$M = \sum_c M_c. \quad (7)$$

Метод кластеризации сети на основе Лувенского алгоритма. Лувенский алгоритм выбран исходя из его способности работать с динамическими 3D-сетями, где геометрия влияют на качество связи.

Этап 1. Локальная оптимизация модулярности. На первой стадии выполняется поиск локальных кластеров минимальных размеров с оптимальным значением функции модулярности.

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.

Пересчёт изменения модулярности ΔM :

$$\Delta M = \left[\frac{\Sigma_{in} + w_i}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot} + w_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Для каждого узла вычисляется, как его перемещение из текущего кластера в другой (или создание нового кластера) повлияет на значение модулярности ΔM .

Выбор кластера с максимальным 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.

Формула ΔM обеспечивает сравнение текущего вклада узла i в модулярность с его вкладом после переноса.

Этап 2. Сжатие сети. Сжатие сети — это второй этап работы Лувенского алгоритма, следующее за локальной оптимизацией модулярности (M). 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 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.

Этапы 1 и 2 повторяются, пока не будет достигнута оптимальная величина коэффициента модулярности (когда изменений модулярности больше не будет происходить).

В результате кластеризации сеть разбивается на k кластеров (C_1, C_2, \dots, C_k), где каждый кластер содержит набор узлов V_i , определяемый в соответствии с оптимизацией модулярности.

Выбор референсного узла. Для этого из общего графа сети выделим подграф, содержащий только узлы, принадлежащие одному кластеру C_l . 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 ребер эффективно (с учетом вероятности доставки) соединяет узел b_j с другими узлами $b_i \in C_l$ внутри кластера. Формула расчёта средневзвешенной вероятности передачи сигнала на узел b_j :

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

где w_{ij} — вероятность успешной передачи данных между узлами b_i и b_j , принадлежащими одному и тому же кластеру C_l , Референсным узлом кластера назначается узел с наибольшей средневзвешенной вероятностью передачи сигнала. Она определяется по следующему правилу:

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

Благодаря наибольшему числу связей с другими узлами в своём кластере он становится наиболее эффективным выбором для управления передачей данных внутри кластера.

При разряде батарей сенсоров и появлении необходимости динамической рекластеризации сети, узлы с большим числом связей окажутся, очевидно, наиболее разряженными, поэтому кроме связности необходимо еще учитывать остаточную энергию сенсора. Обозначим ее как

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{E_0}, \quad (11)$$

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

$$Eff_{node}(b_j \in C_l) = \frac{1}{2m_l} \sum_{b_i \in C_l} w_{ij} \varepsilon_j. \quad (12)$$

Тогда референсным будет назначен узел

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

Для каждого кластера C_l создаётся следующая структура: $\{C_l \mapsto \{j \mid b_j\}, b_{ref(C_l)}\}$

Таким образом, каждый кластер представляется парой чисел, где:

- ◆ Первое значение j – узел, входящий в кластер.
- ◆ Второе значение $b_{ref(C_l)}$ – центральный (референсный) узел, который выполняет функции управления и координации передачи данных внутри этого кластера.

Этот подход обеспечивает эффективное управление кластером и минимизирует задержки и энергопотребление при передаче данных.

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.

Использование модифицированного алгоритма Дейкстры для нахождения оптимальных путей передачи сообщений в кластере. Для повышения надёжности передачи данных в условиях подводной среды предложен алгоритм на основе метода Дейкстры, который вместо минимизации расстояния фокусируется на выборе маршрутов с максимальной вероятностью успешной передачи сообщений.

Шаги модифицированного алгоритма:

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

Каждое ребро l_{ij} 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 ε_i и узла приемника ε_j , так что формула расчёта средневзвешенной вероятности передачи сигнала заменится на формулу средневзвешенной эффективности передачи по ребру:

$$\varepsilon_i = \frac{E_i}{E_0}, \quad \varepsilon_j = \frac{E_j}{E_0}, \quad Eff_{route}(b_i, b_j) = w_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j, \quad (13)$$

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 $D(s) = 1$. Создается массив $Prev(b)$, который фиксирует предшествующий узел в оптимальном маршруте до b .

2. Выбор исходного узла. Алгоритм начинается с некоторого исходного узла s , который может быть референсным узлом кластера или узлом, откуда начинается передача данных. Узел s помещается в множество S , представляющее обработанные узлы.

3. Обновление вероятностей соседних узлов. Для каждого узла u , соседнего с s , пересчитывается вероятность успешной передачи:

$$D(u) = \max \left(D(u), D(s) \cdot \text{Eff}_{route}(b_i, b_j) \right), \tag{14}$$

где $\text{Eff}_{route}(b_s, b_u)$ – средневзвешенная эффективность передачи по ребру между узлами s и u . Если $D(u)$ обновлено, то в $Prev(v)$ записывается s .

4. Выбор следующего узла. Среди всех узлов, не входящих в S , выбирается узел b с максимальным значением $D(b)$:

$$b = \arg \max_{u \notin S} D(u). \tag{15}$$

Этот узел добавляется в множество S .

5. Повторение шагов. Алгоритм повторяет шаги 3–4 до тех пор, пока не будут обработаны все узлы в графе или пока не будет найден путь до целевого узла. Возможно еще ограничение, связанное с тем, что построение маршрута возможно только внутри кластера.

6. Реконструкция пути. После завершения работы алгоритма путь от исходного узла s до любого другого узла t реконструируется с помощью массива $Prev$, который фиксирует предшествующий узел на пути.

В результате в каждом кластере $C_k \subset B$ оказываются построены оптимальные пути 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 $(b_{\{k_1\}}, b_{\{k_2\}}, \dots)$ с вероятностью передачи:

$$\text{Eff}_{route}(b_i, b_j) = \prod_{k=1}^m \text{Eff}_{route}(b_k, b_{(k+1)}), \tag{16}$$

где m – количество промежуточных сенсоров на пути, $p_{k(k+1)}$ – вероятность передачи между двумя последовательными сенсорами 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. Сеть адаптируется к изменениям среды или расход энергии. Вероятности передачи $p(r_{ij})$ и веса рёбер постоянно обновляются.

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. Эта модификация алгоритма Дейкстры позволяет учитывать уникальные особенности подводной среды, что делает её особенно эффективной для подводных беспроводных сенсорных сетей.

Пример работы топологической кластеризации и иерархического присвоения уровня ретрансляции представлен на рис. 3

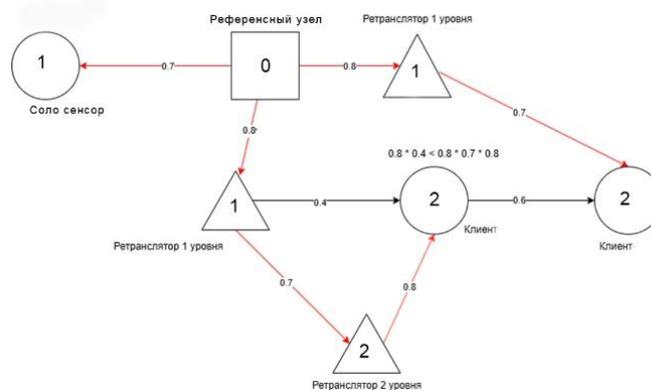


Рис. 3. Определение уровней ретрансляции в сети

Метод управления доступом к среде на основе расписания передач. В основе алгоритма реализующего протокол обмена сообщениями лежит принцип временного разделения (временных слотов) – TDMA (Time Division Multiple Access) [27], благодаря которому каждый сенсор сети может получить свои временные слоты для передачи сообщений.

Порядок формирования временных слотов. 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.

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. Каждый TDMA-кадр T_{frame} разделен на количество слотов одинакового размера, t_{slot} . Количество слотов можно рассчитать, как:

$$N_{slot} = \frac{T_{frame}}{t_{slot}}. \quad (17)$$

Длина слота t_{slot} имеет вид

$$t_{slot} = t_s + T_C + \tau \quad (18)$$

и складывается из времени, необходимого для отправки сообщения $t_s = 0.02 \text{ c}$, задержки распространения сигнала $T_C = 2r/v_c$ 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). Это значит, что одна отправка сообщения занимает у любого сенсора время $T_{frame} = N_{slot}t_{slot}$. Время T_C пока сигнал распространяется в водной среде сенсор не может ни отправлять другие сообщения, ни получать, а вынужден находиться в режиме ожидания. Кроме того, он находится в режиме ожидания в течении $(N_{slot} - 1)t_{slot}$. После временного интервала T_{frame} сенсор b может переходить к отправке следующего сообщения или перепосылке данного сообщения тому же или другому соседу.

Описание алгоритма распределения сенсоров во временные слоты:

Инициализация. Первый сенсор из списка B назначается в первый временной слот ($i = 1$): $b_1 \in T_1$. Это означает, что данный сенсор начинает процесс распределения временных слотов.

Распределение следующих сенсоров. Для каждого последующего сенсора распределение во временные слоты выполняется на основе следующего выражения. Пусть в слот T уже распределены сенсоры $b_1, b_2 \dots b_{i-1}$. Тогда сенсор b_i можно распределить в тот же временной слот, если

$$T_{is}(b) = \{b_i \in B \mid a_{i,i-1} = 0 \wedge b(b_i) \neq b(b_{i-1})\}, \quad (19)$$

где

$a_{i,i-1} = 0$ – сенсор b_i и ранее распределенный сенсор b_{i-1} могут оказаться в одном временном слоте, если они не связаны,

$b(b_i)$ – целевой сенсор, которому b_i передаёт сообщение. Условие $b(b_i) \neq b(b_{i-1})$ означает, что в одном временном слоте не должно быть двух сенсоров, передающих данные в один и тот же целевой сенсор.

Распределение ретрансляторов. Для каждого ретранслятора вычисляется его уровень ретрансляции k_b от референсного узла. Все сенсоры на данном уровне k_b рассматриваются для распределения в временные слоты. Ретранслятор может быть добавлен в временной слот только если он не создаёт интерференции с другими сенсорами в том же слоте.

Схематичное представление работы алгоритма представлено на рис. 4.

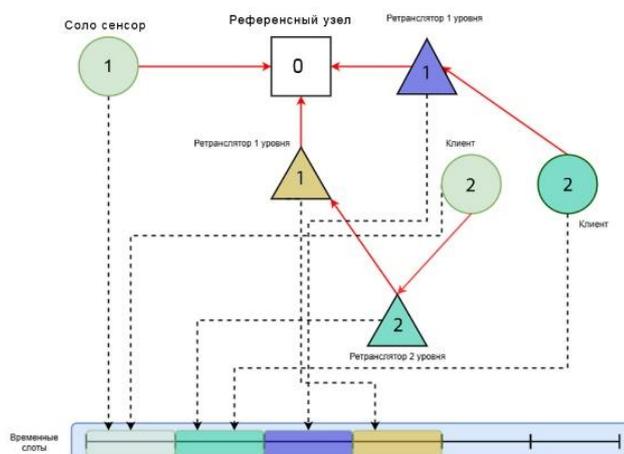


Рис. 4. Реализация TDMA протокола

На рис. 4 кружками отмечены обычные сенсоры, квадратом отмечен референсный узел в каждом кластере, треугольниками отмечены сенсоры ретрансляторы. Стоит также заметить, что на рисунке 4 одинаковым цветом выделены одинаковые временные слоты передачи сигнала.

Динамическая рекластеризация и процесс завершения работы ПБСС. Процесс динамической рекластеризации в подводной беспроводной сенсорной сети (ПБСС) является ключевым механизмом, обеспечивающим надежность и энергоэффективность системы при длительной эксплуатации. Сеть, состоящая из множества узлов, организованных в кластеры, функционирует до тех пор, пока достаточное количество узлов обладает энергетическим запасом для передачи данных.

На каждом этапе передачи данных происходит мониторинг уровня энергии узлов в сети. У каждого сенсора сети b_i есть текущее значение энергии E_i , и существует пороговое значение энергии E_{\min} , ниже которого узел считается "мертвым" и более не участвует в процессе передачи данных. Процесс динамической рекластеризации инициируется, когда хотя бы один узел в сети достигает критического уровня энергии:

$$E_i < E_{\min}. \quad (20)$$

В этом случае сеть перестраивает свою топологию, что включает пересчет вероятностей кластеризации, обновление всех матриц связей и построение новых топологических и временных кластеров.

Завершение работы сети. Процесс передачи данных продолжается в новой конфигурации до тех пор, пока количество активных сенсоров B_{alive} не упадет ниже определенного порогового значения $\min(B_{alive})$ при котором сеть считается неработоспособной

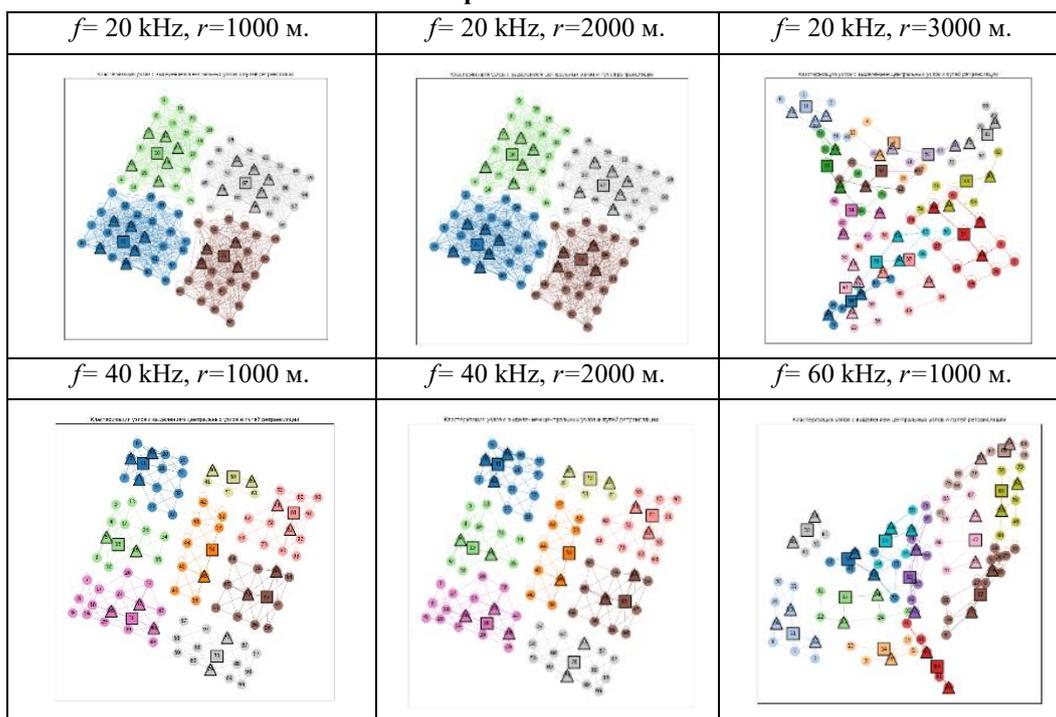
$$|B_{alive}| < \min(B_{alive}). \quad (21)$$

Результаты работы имитационного комплекса моделирования сети ПБСС. Имитационный комплекс моделирования разработан на основе языка программирования Python с использованием дополнительных библиотек.

На первом этапе было проведено исследование зависимости количества кластеров от частоты передачи сигнала и размера акватории. Параметры сенсоров сети были взяты аналогично работам [16–18]. Был рассмотрен диапазон частот f от 20 kHz до 60 kHz., с расстояниями r между сенсорами от 1000 м. до 3000 м. Полученные результаты кластеризации сведены в табл. 1.

Таблица 1

Визуализация топологической кластеризации при различных частотах f и расстояниях r



Стоит отметить закономерность, что при увеличении расстояний между сенсорами, увеличивается количество кластеров и при предельно больших расстояниях каждый сенсор становится отдельным кластером. Как видно, при увеличении частоты сигнала при одинаковых размерах количество кластеров также увеличивается, что обусловлено большей потерей данных на больших частотах.

Следующим этапом было проведено сравнительное моделирование разработанного алгоритма в трех случаях: №1 с алгоритмами LEACH, UCUBG, DBR, NUC-EB [22]; №2 с алгоритмами LEACH, ICA, PPWURC и др. [23]; с ранее выполненными работами авторов [16–18]. Входные параметры моделирования № 1 и № 2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Входные параметры моделирования

	№1	№2	№3
Размер акватории (м.)	100×100×100	150*150*150	10000*10000
Начальная энергия (Дж.)	2000	40	864
Частота передачи сигнала (кГц)	10	40	60
Количество сенсоров (шт.)	200	30	100

Эксперимент 1. Рассматривался случай псевдослучайного распределения сенсоров на основе алгоритма Халтона. Результаты согласно параметрам из табл. 2 представлено на рис. 5.

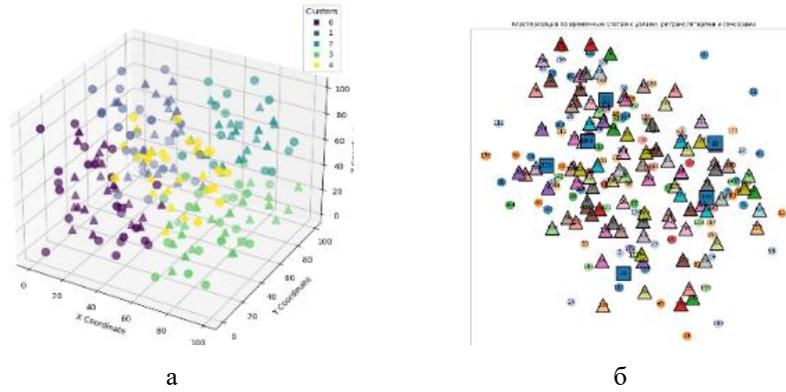


Рис. 5. Моделирование работы сети в эксперименте 1

В результате распределения было образовано 5 топологических кластеров, представленных на рис. 5,а, количество временных слотов (представленных на рис. 5,б – 8. В результате выполнения моделирования были получены данные о количестве выживших сенсоров в зависимости от количества итераций. Собранные данные были сравнены с другими исследованиями и отображены на одном графике, который представлен на рис. 6.

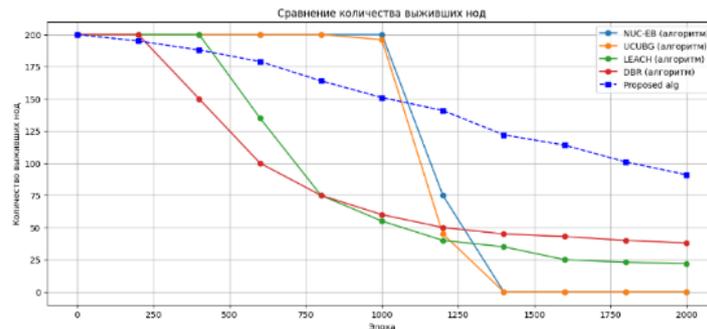


Рис. 6. График количества выживших сенсоров в зависимости от количества эпох (синяя пунктирная линия – предложенный алгоритм кластеризации)

Эксперимент 2. Рассматривался случай случайного распределения сенсоров в акватории. Результаты согласно параметрам из табл. 2 представлены на рис. 7, 8.

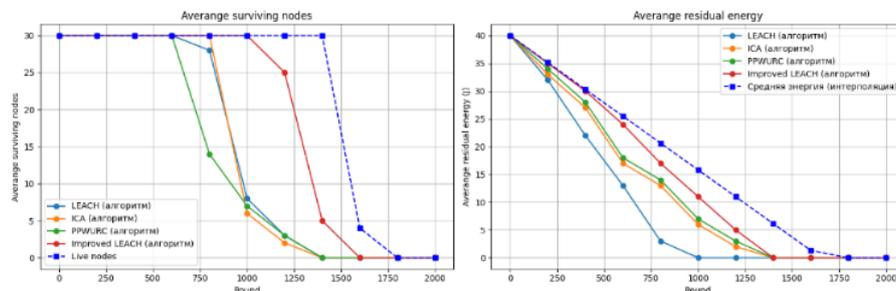


Рис. 7. Графики количества выживших сенсоров в зависимости от количества эпох и средней энергии сенсоров в сети (синяя пунктирная линия – предложенный алгоритм кластеризации)

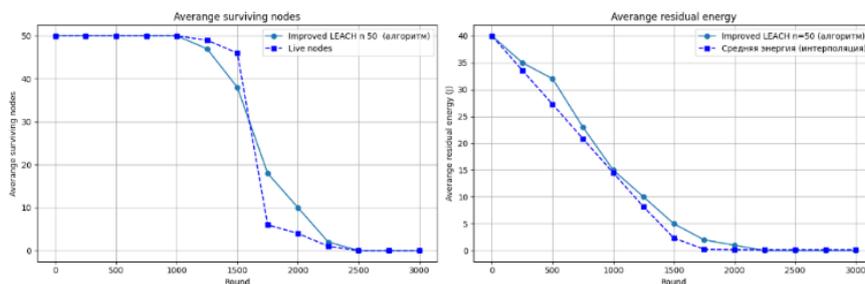


Рис. 8. Графики количества выживших сенсоров в зависимости от количества эпох и средней энергии сенсоров в сети (синяя пунктирная линия – предложенный алгоритм кластеризации)

Результаты, полученные в ходе второго эксперимента, демонстрируют существенное увеличение времени жизни сети в целом. При рассмотрении сети, состоящей из 30 сенсоров, разряд сети начинается после 1400 эпохи, в то время как при иных методах кластеризации сеть начинает разряд значительно раньше (на 1000 эпохе или ранее). На рисунке 8 представлен график разряда сети, демонстрирующий меньшую скорость разряда в предложенном алгоритме кластеризации, по сравнению с другими рассмотренными методами.

Эксперимент 3. Рассматривался случай регулярного ортогонального распределения сети, состоящей из трех слоев на каждом из которых задана своя вероятность доставки сообщения. Результаты зависимости полных энергетических затрат от линейного размера сети (N) и сравнения количества потерянных пакетов (PLR) от количества максимального количества перепосылок (N), согласно параметрам, из табл. 2 представлен на рис. 9.

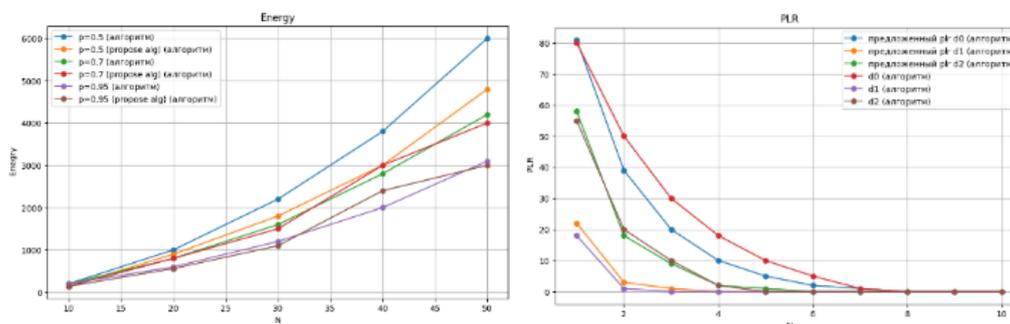


Рис. 9. Графики зависимости энергии сети от линейного размера сети и график PLR от максимального количества перепосылок

Результаты моделирования подтверждают высокую энергетическую эффективность и качество передаваемых данных при идентичных параметрах сенсорной сети

Выводы. Представленная имитационная модель позволяет решать ряд ключевых проблем, связанных с управлением ресурсами ПБСС. Во-первых, предложенный алгоритм уменьшает количество потерянных сообщений за счет оптимизации процесса передачи данных. Во-вторых, алгоритм позволяет снизить общее энергопотребление сети, за счет балансировки нагрузки между узлами и эффективного использования ретрансляторов. Используемый TDMA протокол, обеспечивает одновременную работу временных слотов, что также сокращает общее время работы сети, минимизируя энергозатраты. Предложенная методология рекластеризации повышает надежность сети и увеличивает время её автономной работы.

Следует отметить, что применение лувенского алгоритма для кластеризации в подводных беспроводных сенсорных сетях обеспечивает несколько преимуществ.

Гибкость в адаптации к динамике сети. В реальных условиях подводные сенсоры могут двигаться под воздействием течений или других факторов, изменяя свою позицию в сети. Лувенский алгоритм с его возможностью динамической рекластеризации позволяет поддерживать эффективную структуру сети даже в таких условиях.

Энергоэффективность. Благодаря использованию энергетических параметров при кластеризации, предложенный метод снижает нагрузку на узлы с низким уровнем энергии, что позволяет продлить время жизни сети.

Минимизация потерь при передаче данных. За счет кластеризации алгоритм снижает количество дальних передач между узлами, что особенно важно для подводной среды, где потери сигнала значительно выше, чем в наземных сетях.

Таким образом, использование лувенского алгоритма и метода Дейкстра в предложенной модели позволило построить устойчивую, адаптивную и энергоэффективную кластерную структуру для подводной беспроводной сенсорной сети.

Сравнение полученных результатов имитационного моделирования с результатами моделей других авторов демонстрируют увеличение времени жизни ПБСС и большую надежность доставки сообщений для рассмотренных конкретных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буров Д.В., Каменная Е.В., Щербинина И.А. Локализация и маршрутизация в беспроводных подводных сетях, используемых для охраны мариферм // ТДР. – 2017. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lokalizatsiya-i-marshrutizatsiya-v-besprovodnyh-podvodnyh-setyah-ispolzuyemyh-dlya-ohrany-mariferm> (дата обращения: 26.02.2025).
2. Громашева О.С., Каменная Е.В., Леонтьева Н.А., Щербинина И.А. Обзор возможностей применения подводной акустической сенсорной сети и предлагаемых архитектурных решений реализации // ТДР. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-primeneniya-podvodnoy-akusticheskoy-sensornoy-seti-i-predlagaemyh-arhitekturnyh-resheniy-realizatsii> (дата обращения: 26.02.2025).
3. Тарик А., Азам Ф., Анвар М. В., Захур Т., Музаффар А.В. Последние тенденции в развитии подводной беспроводной сенсорной сети: систематический обзор литературы // Тр. ИСП РАН. – 2021. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poslednie-tendentsii-v-razvitii-podvodnoy-besprovodnoy-sensornoy-seti-sistematicheskii-obzor-literatury> (дата обращения: 26.02.2025).
4. Heinzelman W.R., Chandrakasan A. and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA, 2000. – Vol. 2. – P. 10. – DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
5. Younis O. and Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks // in IEEE Transactions on Mobile Computing. – Oct.-Dec. 2004. – Vol. 3, No. 4. – P. 366-379. – DOI: 10.1109/TMC.2004.41.
6. Sangho Yi, Junyoung Heo, Yookun Cho, Jiman Hong. PEACH: Power-efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks // Computer Communications. – 2007. – Vol. 30, Issues 14–15. – P. 2842-2852. – ISSN 0140-3664, 10.1016/j.comcom.2007.05.034.
7. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., & Горина Е.В. Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – 22 (2). – С. 294-301.
8. Li Qing, Qingxin Zhu, Mingwen Wang. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks // Computer Communications. – 2006. – Vol. 29, Issue 12. – P. 2230-2237. – ISSN 0140-3664, doi.org/10.1016/j.comcom.2006.02.017.
9. Khan A., & Pirzada A. Energy-Efficient Vertical Communication in Underwater Wireless Sensor Networks // International Journal of Communication Systems. – 2012. – 25 (12). – P. 1585-1601.
10. Partan J., Kurose J., & Levine B.N. A Survey of Practical Issues in Underwater Networks // ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. – 2006. – 11 (4). – P. 23-33.
11. Heinzelman W.B., Chandrakasan A., & Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. – 2000. – P. 1-10.
12. Rodoplu V., & Meng T.H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1999. – 17 (8). – P. 1333-1344.
13. Kartik P., & Hanno T. Probabilistic Routing in Underwater Sensor Networks: A Survey and the Way Forward // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – 17 (2). – P. 626-647.

14. Евстифеева Е.А., Семейкин В.Д. Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-vybora-golovnogo-klasternogo-uzla-v-besprovodnoy-sensornoj-seti-na-osnove-nechetkoy-logiki> (дата обращения: 26.02.2025).
15. Махров С.С. Нейросетевая кластеризация узлов беспроводной сенсорной сети // Т-Comm. – 2014. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-klasterizatsiya-uzlov-besprovodnoy-sensornoj-seti> (дата обращения: 26.02.2025).
16. 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. – 2024. – Appl. 23. – P. 960-983. – <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00444-z>.
17. 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. – 23 (5). – С. 1532-1570.
18. Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Semenov N.N. et al. Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway // J. Marine. Sci. – 2022. – Appl. 21. – P. 179-196. – <https://doi.org/10.1007/s11804-022-00268-9>.
19. Mar M. De er, Arthur S.C. França, Debabrata Panja, Michael X. Cohen. Characterizing neural phase-space trajectories via Principal Louvain Clustering // Journal of Neuroscience Methods. – 2021. – Vol. 362. – 109313. – ISSN 0165-0270, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2021.109313>.
20. Грошков П.В. Автоматизация процесса передачи данных по сети. Множественный доступ // Проблемы Науки. – 2017. – № 18 (100). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-peredachi-dannyh-po-seti-mnozhestvennyy-dostup> (дата обращения: 26.02.2025).
21. Базаров Ю.И., Исмагилов М.И., Рогов А.Н. Новая морская цифровая связь для е-Навигации // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2018. – № 3 (76). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-morskaya-tsifrovaya-svyaz-dlya-e-navigatsii> (дата обращения: 26.02.2025).
22. Yi J., Tang J., Yuan F., Qiao G., Dai D. Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization // Sensors. – 2023. – 23. – 5466. – <https://doi.org/10.3390/s23125466>.
23. 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. – 24. – 556. – <https://doi.org/10.3390/s24020556>.
24. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996. – 656 p.
25. Thorp W.H. Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range // J. Acoust. Soc. Am. – 1965. – Vol. 38. – P. 648-654.
26. 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. – P. 12-18. – <https://doi.org/10.1109/MNET.2006.1637927>.
27. Mosqueda-Arvizu C.-A., Romero-González J.-A., Córdova-Esparza D.-M., Terven J. Chaparro-Sánchez R., Rodríguez-Reséndiz J. Logical Execution Time and Time-Division Multiple Access in Multicore Embedded Systems: A Case Study // Algorithms. – 2024. – 17. – 294. – <https://doi.org/10.3390/a17070294>.

REFERENCES

1. Burov D.V., Kamennaya E.V., Shcherbinina I.A. Lokalizatsiya i marshrutizatsiya v besprovodnykh podvodnykh setyakh, ispol'zuemykh dlya okhrany mariferam [Localization and routing in wireless underwater networks used to protect marine farms], TDR [Transport Business in Russia], 2017, No. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/lokalizatsiya-i-marshrutizatsiya-v-besprovodnyh-podvodnyh-setyah-ispolzuemyh-dlya-okhrany-mariferam> (accessed 26 February 2025).
2. Gromasheva O.S., Kamennaya E.V., Leont'eva N.A., Shcherbinina I.A. Obzor vozmozhnostey primeneniya podvodnoy akusticheskoy sensornoj seti i predlagaemykh arkhitekturnykh resheniy realizatsii [Review of the Possibilities of Using an Underwater Acoustic Sensor Network and the Proposed Architectural Implementation Solutions], TDR [Transport Business in Russia], 2016, No. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-primeneniya-podvodnoy-akusticheskoy-sensornoj-seti-i-predlagaemykh-arhitekturnykh-resheniy-realizatsii> (accessed 26 February 2025).
3. Tarik A., Azam F., Anvar M.V., Zakhur T., Muzaffar A.V. Poslednie tendentsii v razvitii podvodnoy besprovodnoy sensornoj seti: sistematcheskiy obzor literatury [Recent trends in the development of underwater wireless sensor network: a systematic literature review], Tr. ISP RAN [Proceedings of ISP RAS], 2021, No. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poslednie-tendentsii-v-razvitii-podvodnoy-besprovodnoy-sensornoj-seti-sistematcheskiy-obzor-literatury> (accessed 26 February 2025).

4. *Heinzelman W.R., Chandrakasan A. and Balakrishnan H.* Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA, 2000*, Vol. 2, pp. 10. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
5. *Younis O. and Fahmy S.* HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Oct.-Dec. 2004, Vol. 3, No. 4, pp. 366-379. – DOI: 10.1109/TMC.2004.41.
6. *Sangho Yi, Junyoung Heo, Yookun Cho, Jiman Hong.* PEACH: Power-efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks, *Computer Communications*, 2007, Vol. 30, Issues 14–15, pp. 2842-2852. ISSN 0140-3664, 10.1016/j.comcom.2007.05.034.
7. *Tatarnikova T.M., Bimbetov F., & Gorina E.V.* Algoritm energoeffektivnogo vzaimodeystviya uzlov besprovodnoy sensornoy seti [Algorithm for energy-efficient interaction of wireless sensor network nodes], *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2022, 22 (2), pp. 294-301.
8. *Li Qing, Qingxin Zhu, Mingwen Wang.* Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks, *Computer Communications*, 2006, Vol. 29, Issue 12, pp. 2230-2237. – ISSN 0140-3664, doi.org/10.1016/j.comcom.2006.02.017.
9. *Khan A., & Pirzada A.* Energy-Efficient Vertical Communication in Underwater Wireless Sensor Networks, *International Journal of Communication Systems*, 2012, 25 (12), pp. 1585-1601.
10. *Partan J., Kurose J., & Levine B.N.* A Survey of Practical Issues in Underwater Networks, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2006, 11 (4), pp. 23-33.
11. *Heinzelman W.B., Chandrakasan A., & Balakrishnan H.* Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000, pp. 1-10.
12. *Rodoplu V., & Meng T.H.* Minimum Energy Mobile Wireless Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17 (8), pp. 1333-1344.
13. *Kartik P., & Hanno T.* Probabilistic Routing in Underwater Sensor Networks: A Survey and the Way Forward, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17 (2), pp. 626-647.
14. *Evstifeeva E.A., Semeykin V.D.* Metodika vybora golovnogo klaster'nogo uzla v besprovodnoy sensornoy seti na osnove nechetkoy logiki [Methodology for selecting the head cluster node in a wireless sensor network based on fuzzy logic], *Vestnik AGTU. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of ASTU. Series: Management, computing engineering and informatics], 2018, No. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-vybora-golovnogo-klaster'nogo-uzla-v-besprovodnoy-sensornoy-seti-na-osnove-nechetkoy-logiki> (accessed 26 February 2025).
15. *Makhrov S.S.* Neyrosetevaya klasterizatsiya uzlov besprovodnoy sensornoy seti [Neural network clustering of wireless sensor network nodes], *T-Comm*, 2014, No. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-klasterizatsiya-uzlov-besprovodnoy-sensornoy-seti> (accessed 26 February 2025).
16. *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.*, 2024, Appl. 23, pp. 960-983. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11804-024-00444-z>.
17. *Fedorova T.A., Ryzhov V.A., & Safronov K.S.* Ispol'zovanie gibridnoy kommunikatsionnoy arkhitektury podvodnoy besprovodnoy sensornoy seti dlya povysheniya ee vremeni zhizni i effektivnosti [Using a hybrid communication architecture of an underwater wireless sensor network to increase its lifetime and efficiency], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2024, 23 (5), pp. 1532-1570.
18. *Fedorova T.A., Ryzhov V.A., Semenov N.N. et al.* Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway, *J. Marine. Sci.*, 2022, Appl. 21, pp. 179-196. – <https://doi.org/10.1007/s11804-022-00268-9>.
19. *Mar M. De er, Arthur S.C. França, Debabrata Panja, Michael X. Cohen.* Characterizing neural phase-space trajectories via Principal Louvain Clustering, *Journal of Neuroscience Methods*, 2021, Vol. 362, 109313. ISSN 0165-0270, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2021.109313>.
20. *Groshkov P.V.* Avtomatizatsiya protsessa peredachi dannykh po seti. Mnozhestvennyy dostup [Automation of the process of data transmission over the network. Multiple access], *Problemy Nauki* [Problemy Nauki], 2017, No. 18 (100). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-peredachi-dannyh-po-seti-mnozhestvennyy-dostup> (accessed 26 February 2025).
21. *Bazarov Yu.I., Ismagilov M.I., Rogov A.N.* Novaya morskaya tsifrovaya svyaz' dlya e-Navigatsii [New maritime digital communication for e-Navigation], *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics], 2018, No. 3 (76). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/novaya-morskaya-tsifrovaya-svyaz-dlya-e-navigatsii> (accessed 26 February 2025).

22. Yi J., Tang J., Yuan F., Qiao G., Dai D. Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization, *Sensors*, 2023, 23, 5466. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23125466>.
23. 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, 24, 556. Available at: <https://doi.org/10.3390/s24020556>.
24. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996, 656 p.
25. Thorp W.H. Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, Vol. 38, pp. 648-654.
26. 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. Available at: <https://doi.org/10.1109/MNET.2006.1637927>.
27. Mosqueda-Arvizu C.-A., Romero-González J.-A., Córdova-Esparza D.-M., Terven J. Chaparro-Sánchez R., Rodríguez-Reséndiz J. Logical Execution Time and Time-Division Multiple Access in Multicore Embedded Systems: A Case Study, *Algorithms*, 2024, 17, 294. Available at: <https://doi.org/10.3390/a17070294>.

Маевский Андрей Михайлович – АО НПП ПТ «Океанос»; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н.; н.с.; руководитель отдела морской робототехники СПбГМТУ.

Рыжов Владимир Александрович – СПбГМТУ; e-mail: ryzhov@smtu.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой ПМИММ.

Федорова Татьяна Александровна – СПбГМТУ; e-mail: fedorova.tan@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; к.ф.-м.н.; доцент кафедры ПМИММ.

Кожемякин Игорь Владиленович – СПбГМТУ; e-mail: 1861vp@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; начальник Управления оборонных исследований и разработок СПбГМТУ.

Буров Никита Михайлович – ГУАП; e-mail: burov.nm@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; студент.

Maevsky Andrey Mikhailovich – “Oceanos” JSC; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; researcher; head of marine department SMTU.

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – SMTU; e-mail: ryzhov@smtu.ru; Saint Petersburg, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of AM&MM Department.

Fedorova Tatiana Aleksandrovna – SMTU; e-mail: fedorova.tan@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; cand. of phys and math. sc.; associate professor of AM&MM Department.

Kozhemyakin Igor Vladilenovich – SMTU; e-mail: 1861vp@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; head of Division Defense Research and Development.

Burov Nikita Michailovich – GUAP; e-mail: burov.nm@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; student.

УДК 681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-81-90

В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко
АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ С КОДИРОВАНИЕМ РИДА-СОЛОМОНА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ

Уменьшение вероятности возникновения ошибок при передаче сообщений имеет значение в спутниковых, беспроводных и космических системах связи. Уменьшение вероятности битовых ошибок в беспроводной системе связи возможно при применении кодирования отправляемых данных. Использование канального кодирования позволяет обнаружить и исправить ошибки при передаче сообщения в зашумленном канале. Целью работы является исследование влияния применения кодов Рида-Соломона и алгоритма пространственно-временной обработки сигналов в прием-