

Т.А. ФЕДОРОВА, В.А. РЫЖОВ, К.С. САФРОНОВ
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ
АРХИТЕКТУРЫ ПОДВОДНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ
СЕНСОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ВРЕМЕНИ
ЖИЗНИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Федорова Т.А., Рыжов В.А., Сафронов К.С. **Использование гибридной коммуникационной архитектуры подводной беспроводной сенсорной сети для повышения ее времени жизни и эффективности.**

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ основных функциональных характеристик подводных беспроводных сенсорных сетей (ПБСС) со стационарной и гибридной коммуникационными архитектурами. Указанные ПБСС состоят из сенсорных узлов, расположенных на морском дне и надводных межсредных шлюзов, обеспечивающих передачу информационных пакетов между подводным и надводным сегментами сети. В стационарной ПБСС роль шлюзов выполняют заякоренные буи, в гибридной – мобильные транспортные платформы. С использованием математического аппарата, основанного на вероятностном подходе, проведена оценка функциональных характеристик альтернативных коммуникационных архитектур ПБСС с энергетической точки зрения - определены общие энергетические затраты сети на пересылку сообщений и время жизни сенсоров сети. Для численного анализа функциональных характеристик ПБСС рассмотрены достаточно широкие диапазоны изменения проектных параметров сети, таких как: размер акватории, требуемое количество и варианты размещения сенсорных узлов, вероятность доставки пакета в акватории (физические параметры среды), в которых осуществлялся поиск «оптимального» с энергетической точки зрения решения. Выполненное авторами исследование показывает, что мобильность играет важную роль в повышении качества функционирования подводной сети в аспектах покрытия (обеспечения связности), энергоэффективности и времени жизни. Мобильный элемент в виде волнового глайдера, выполняющий роль межсредного шлюза, способен функционировать в акватории в течение продолжительного времени, что говорит о перспективности его использования для прикладных задач сбора, накопления и ретрансляции информации в рамках интернета подводных вещей.

Ключевые слова: подводные беспроводные сенсорные сети, гибридные сети, мобильный межсредный шлюз, гидроакустическая связь, критерий эффективности сети, время жизни сети.

1. Введение. В последние два десятилетия активно развивается концепция интернета подводных вещей [1]. Интернет подводных вещей представляет собой сеть интеллектуальных взаимосвязанных подводных объектов, оснащенных исполнительными устройствами и сенсорами, позволяющими выполнять различные действия, связанные с мониторингом, контролем и управлением. Эта сеть обладает возможностями самообучения и интеллектуальных вычислений.

Интернет подводных вещей призван стать мощной технологией для поддержки различных приложений, таких как сбор информации о водной среде в реальном времени, военные приложения, морская

навигация и безопасность, прогнозирование и контроль стихийных бедствий, контроль экологической и техногенной безопасности, разведка полезных ископаемых, контроль биоресурсов и др. Таким образом, интернет подводных вещей имеет большие перспективы стать серьезной основой «умного океана» [2 – 3].

Для успешного развертывания приложений интернета подводных вещей необходимы сети связи, обеспечивающие оптимальную производительность, эффективность и надежность передачи данных.

Существующие на сегодня решения подводного интернета вещей объединяют морские технические объекты, такие как буи, надводные и подводные суда и аппараты, системы наблюдения за океаном, а также береговые центры обработки данных в гетерогенные сети различного масштаба и назначения [4 – 6].

В два последних десятилетия активно создавались кабельные сети наблюдения за океаном (например, Australian Integrated Marine Observing System, Ocean Networks Canada, Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis), предназначенные для долгосрочного и непрерывного мониторинга подводных данных и их передачи в центры обработки [7 – 10].

Однако ввиду того, что развертывание кабельных сетей в морских условиях – весьма дорогостоящее мероприятие, то наряду с их внедрением в то же самое время активно разрабатывалась концепция беспроводных сетей. Именно разработка беспроводной технологии инициировала переход подводной связи на качественно новый уровень. Примером практической реализации таких сетей является, например, Persistent Littoral Undersea Surveillance Network (PLUSNet) [11].

Исследования радиочастотной, оптической, магнитоиндуктивной и акустической технологий беспроводной передачи информации под водой показали преимущества и недостатки каждой из них. Радиочастотная и магнитоиндуктивная связь могут обеспечивать высокую скорость передачи данных, но только на коротких расстояниях. Оптическая связь обеспечивает хорошую производительность, когда она реализуется в пределах прямой видимости и при условии незначительной мутности воды. Акустическая связь может обеспечить относительно большую дальность передачи, однако ее использование существенно зависит от свойств морской среды.

Несмотря на наличие положительных и отрицательных качеств у каждой из указанных технологий подводной связи, можно

констатировать, что на сегодняшний день гидроакустические технологии ПБСС являются наиболее применимыми в морской практике [12, 13].

При проектировании гидроакустических подводных беспроводных сенсорных сетей различного масштаба под конкретные задачи на первый план встает проблема создания такой архитектуры и компонентов сети, которые будут обеспечивать высокую надежность доставки собранной информации конечному пользователю и длительную автономную работу сети в сложных условиях морской среды [14].

Существует большое количество работ посвященных моделированию ПБСС [15 – 24]: разработке алгоритмов развертывания сетей, протоколов различных уровней OSI, обеспечению связности сетей, энергетической балансировке сетей и др. Задачи решались в 2D и 3D постановках.

Для передачи информации, собранной подводными сенсорами, в надводный сегмент сети используются межсредные шлюзы, роль которых часто выполняют стационарные буи [5]. В последнее время в связи с активным развитием морских робототехнических платформ, в качестве межсредных шлюзов начали рассматриваться такие перспективные транспортные платформы, как волновые и подводные глайдеры [25 – 29], безэкипажные катера и др. В связи с указанным ПБСС, в зависимости от типа межсредного шлюза, можно классифицировать как сети со стационарной или гибридной коммуникационными архитектурами.

Необходимо отметить, что существующие работы по использованию мобильных элементов в беспроводных сенсорных сетях в основном связаны с наземными приложениями. Работ, посвященных функционированию гибридных подводных беспроводных сенсорных сетей (включающих в себя стационарные и мобильные узлы), учитывающих специфику распространения сигнала в водной среде в рамках различных практических приложений, существенно меньше [30].

В работах по подводным акустическим беспроводным сенсорным сетям с мобильными агентами рассматривались задачи моделирования функциональных характеристик в зависимости от типа мобильного агента и природы мобильности. Эти работы были посвящены: учету мобильности агентов (узлов сети), связанной с физическими процессами океана – течениями, внешними возмущениями [31, 32]; использованию мобильных узлов, выполняющих роль референсных узлов сети и роль межсредных

шлюзов передачи сигнала на границе вода-воздух [33, 34]. В последнем случае роль мобильного шлюза выполняли различные робототехнические транспортные платформы – как подводные – автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), подводные глайдеры (ПГ), так и надводные – волновые глайдеры (ВГ), безэкипажные катера (БЭК).

Применение АНПА, как мобильных агентов, в беспроводных сетях обсуждалось в работах [35 – 37].

Рассматривалось использование АНПА, выполняющего функции мобильного элемента ПБСС в рамках следующих сценариев. (1) АНПА использовался как мобильный референсный узел-накопитель, собирающий информацию со стационарных узлов сети (с головных узлов кластеров) по так называемому «rendezvous-based» сценарию – последовательный обход всех головных узлов и шлюзов [38, 39]. Общий объем передачи данных при таком сценарии сводится к минимуму. Кроме того, управляемая мобильность АНПА позволяет использовать подводный канал ближнего действия с высокой скоростью передачи данных для передачи больших объемов информации. (2) АНПА использовался как мобильный агент, выполняющий роль «замещающего» элемента какого-либо стационарного узла в случае его «смерти» в целях сохранения связности сети [40].

В перечисленных работах рассматривались задачи локализации узлов сети с использованием АНПА [41], предлагались различные методы планирования пути подводного аппарата и специальные протоколы маршрутизации [35, 36, 42 – 46]. Решение рассматривалось в рамках задачи коммивояжера, с использованием генетических алгоритмов, модели обучения с подкреплением и др.

В случае использования в качестве мобильного шлюза надводной транспортной платформы, сбор информации осуществляется от референсных узлов, расположенных либо на дне, либо в объеме акватории [2, 27, 47]. При этом надводный мобильный шлюз осуществляет накопление и передачу собранной информации в центр обработки. Безусловно, использование конкретного типа надводной транспортной платформы зависит от особенностей решаемой прикладной задачи, в частности, от требований по периодичности съема сенсорами информации и режиму доставки ее в центр обработки – близком к реальному времени или с возможными задержками, а также от масштабов и глубин акватории. Несмотря на активное практическое использование волновых глайдеров, число работ, посвященных надводным мобильным транспортным

платформам, как агентам ПБСС невелико. В этих работах рассматривались задачи, в основном связанные с использованием волновых глайдеров для локализации узлов сети.

Таким образом, обзор литературы по сбору данных с помощью мобильных платформ показывает, что существующие работы в основном посвящены использованию для указанных целей АНПА. К сожалению, энергетический ресурс таких транспортных платформ весьма ограничен и для реальных долгосрочных миссий по сбору данных с сенсоров ПБСС они мало применимы. Альтернативным решением является использование в качестве управляемой мобильной платформы волнового глайдера, обладающего значительными энергетическими ресурсами за счет использования энергии волн и солнца, и способного выполнять долгосрочные миссии [28]. Существует большой класс практических приложений, для которых время доставки сообщения не является критическим параметром, а большее значение имеет надежность сети. Для решения этих задач использование волнового глайдера, имеющего невысокую скорость перемещения, является весьма актуальным.

В связи с указанным, в данной работе рассматривается задача исследования коммуникационной инфраструктуры гибридной ПБСС, в состав которой входит волновой глайдер, выполняющий функции мобильного шлюза. Авторами предлагается аналитический метод планирования оптимальной траектории движения волнового глайдера для эффективного сбора данных по запросу со стационарных сенсоров сети. Для реализации указанного метода используется оригинальная стохастическая модель функционирования гибридной ПБСС, учитывающая особенности подводного канала.

Предлагаемая работа имеет своей целью дать сравнительную качественную и количественную оценку основных функциональных характеристик гидроакустических ПБСС со стационарной и гибридной коммуникационными архитектурами с точки зрения их энергетической эффективности и времени жизни сетей.

С использованием предложенной авторами вероятностной модели [48] в работе проводится анализ влияния таких проектных параметров как топологические характеристики сети и физические характеристики среды (вероятность доставки пакета) на полные энергетические затраты ПБСС и на время жизни сенсоров.

Полученные теоретические зависимости и результаты моделирования позволили дать энергетическую оценку различных моделей размещения обыкновенных и референсных агентов для стационарной и гибридной сетей, сделать выводы относительно

предпочтительности использования той или иной коммуникационной архитектуры.

2. Постановка задачи

2.1. Коммуникационная архитектура подводной беспроводной сенсорной сети. Рассматривается коммуникационная архитектура подводной беспроводной сенсорной сети (ПБСС), включающая в себя группу стационарных агентов (сенсоров), размещенных на глубоководном плоском дне, и межсредные шлюзы, роль которых могут выполнять либо стационарные буи, либо мобильные транспортные робототехнические платформы (волновой глайдер, безэкипажный катер и др.) (рисунк 1).

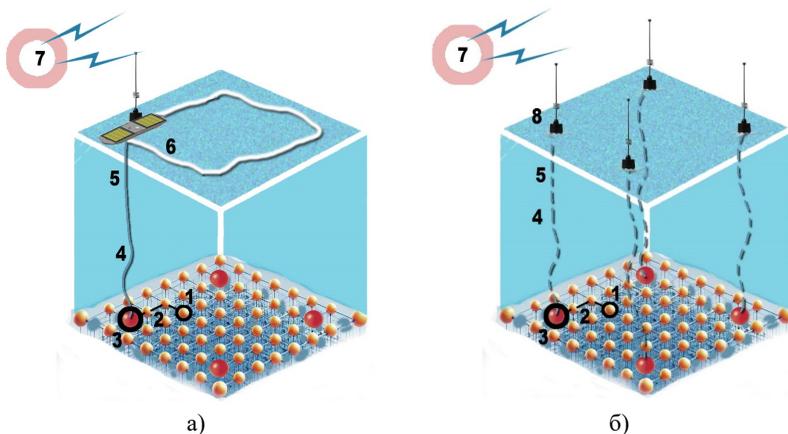


Рис. 1. Структура подводной беспроводной сенсорной сети: а) с мобильным шлюзом, б) со стационарными шлюзами. 1 – обыкновенный сенсор, 2 – путь hop-by-hop до референсного агента, 3 – референсный агент, 4 – гидроакустический канал связи, 5 – мобильный шлюз, 6 – траектория движения мобильного шлюза, 7 – центр обработки данных, 8 – Стационарный буй

Сенсоры выполняют периодические замеры некоторых характеристик среды и передают их по гидроакустическому каналу.

Существует определенное количество референсных агентов, к которым стекается информация от всех остальных – обыкновенных агентов сети. Передача пакета от обычного к референсному агенту осуществляется через ближайшего соседа (hop-by-hop). Далее референсные агенты пересылают полученные (за цикл работы сети) пакеты в шлюз.

Очевидно, что при этом вероятность доставки пакета зависит от расстояния между передающим и принимающим агентами (узлами) и от физических характеристик среды, таких как коэффициент затухания сигнала β , уровень шума в акватории SNR .

Ввиду использования однопутевой многошаговой маршрутизации через обыкновенные узлы, находящиеся рядом с референсными, и через сами референсные, проходит существенно больший информационный трафик.

Очевидно, чем больше данных проходит через узел сети, тем больше его расход энергии. Как следствие, в сети возникает проблема дисбаланса энергопотребления, приводящая к тому, что референсные узлы раньше других выходят из строя из-за разряда аккумуляторов, что влечет за собой уменьшение времени жизни сенсорной сети в целом. Для выравнивания расхода энергии всех узлов сети используют различные методы энергетической балансировки:

- индивидуальный подбор емкости батарей в зависимости от положения устройств в сети и выполняемых ими функций. В этом случае референсные агенты могут оснащаться большими по емкости аккумуляторами;

- разная плотность размещения узлов сети в акватории в зависимости от предполагаемой интенсивности трафика в конкретной зоне;

- использование протоколов маршрутизации, основанных, например, на таких принципах как, чередование дальней и ближней передачи, оценка величины остаточной энергии узлов на пути до шлюза;

- кластеризация;

- использование мобильности отдельных компонентов сети (в том числе, мобильных шлюзов). В качестве мобильного шлюза могут использоваться автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), подводные глайдеры (ПГ), волновые глайдеры (ВГ).

В данной работе в целях энергетической балансировки сети используются идеи кластеризации и мобильности. Роль мобильного агента выполняет надводная робототехническая платформа (например, волновой глайдер).

Качество разбиения 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 референсных узлов ограничена и при большой размерности сети и их неудачном расположении возможно появление «узких мест», в которых резко

возрастают энергозатраты, приводящие к быстрой разрядке аккумуляторов. Для моделирования подобных ситуаций, в данной работе исследуются два варианта размещения референсных агентов, влияющих на пропускную способность сети, и как следствие, на ее надежность и эффективность.

Вариант 1. Стационарная модель ПБСС. Разбиение ортогональной сетки на конечное число квадратных «подрешеток» меньшей размерности (рисунок 2(а)), в центре которых расположены стационарные шлюзы, роль которых выполняют буи. На каждой «подрешетке» обыкновенные агенты передают сообщения в центр – референсному агенту, который в свою очередь передает информацию в вертикальном направлении на шлюз. При этом шлюз передает сообщения дальше в береговой центр обработки данных.

Вариант 2. Гибридная модель ПБСС. Расположение референсных агентов на квадратном контуре (рисунок 2(б)). В этом случае используется мобильный шлюз, которому необходимо обходить этот контур.

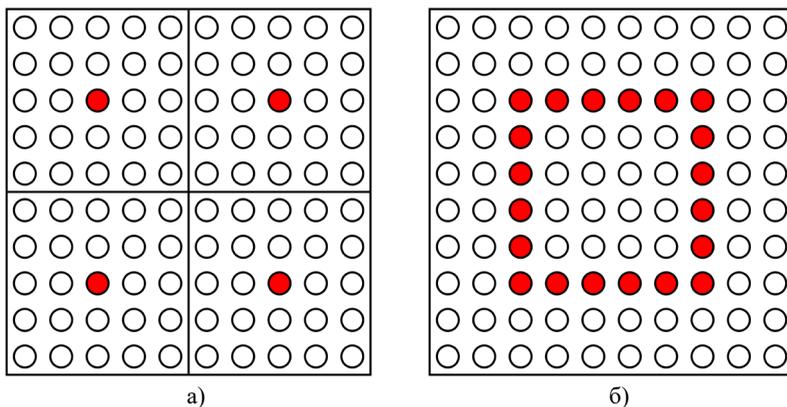


Рис. 2. Модель ПБСС при разных вариантах размещения референсных узлов: а) разбиение сети на квадратные «подрешетки», б) расположение референсных узлов на квадратном контуре. Красные кружки – референсные агенты, передающие сообщения на шлюз

Рассмотрим функционирование сети для указанных вариантов размещения референсных агентов.

2.2. Постановка модельной задачи. В работе рассматривается задача в следующей модельной постановке. Требуется выполнить измерение некоторой характеристики среды и передать эту информацию от каждого обыкновенного сенсора (через цепочку

остальных сенсоров сети) референсным сенсорам, которые в свою очередь должны передать пакеты в шлюз.

Полагается, что:

- сенсорные узлы (обыкновенные и референсные) оборудованы гидроакустическими модемами с одинаковыми характеристиками – имеют несущую частоту f , полосу пропускания B , антенна является ненаправленной.

- все пакеты S (содержащие полезную и служебную информацию) имеют одинаковую длину N_{bit} и передаются с битовой скоростью f_{bit} .

- время работы сети между двумя измерениями характеристик среды (цикл) T ограничено. За это время все обыкновенные сенсоры должны передать результаты измерений через референсных агентов в шлюз и приступить к следующему измерению.

2.3. 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 [49]:

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

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 можно оценить по обобщенной формуле Торпа [50]:

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

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 [31]:

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

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

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

2.4. Протоколы сетевого и канального уровня модели OSI. В качестве протокола маршрутизации в работе рассматривается динамический протокол передачи информации через ближайшего соседа (hop-by-hop), который сводится к тому, что обыкновенные

сенсоры должны передавать сообщения только ближайшим соседям. Если после фиксированного числа передач всем соседям сообщение не передано, оно считается потерянным и сенсор переходит к пересылке следующего стоящего в очереди сообщения. При этом в таблице маршрутизации для каждого сенсора определено, какой сосед имеет для него более высокий приоритет для пересылки сообщения, какие соседи имеют более низкий приоритет, а какие – нулевой.

Протокол управления доступом к среде (МАС-протокол), рассматриваемый в работе – несинхронизированный доступ к гидроакустическому каналу, основанный на конкуренции. Примером такого протокола может служить хорошо известный классический протокол ALOHA [51].

3. Вероятностная модель. Пусть ПБСС расположена в физически однородной среде и имеет вид квадратной ортогональной сетки размерности $n \times n$, в узлах которой расположены сенсоры. Расположение сенсорных узлов на ортогональной сетке удобно тем, что ее геометрические характеристики легко вычислить. Будем говорить, что обыкновенный агент (сообщение) находится на k -ом уровне удаленности от референсного агента, если для доставки сообщения требуется k пересылок. Пусть вероятность успешной передачи сообщения между соседними сенсорами постоянна в данной акватории и равна p .

Введем основные физические характеристики исследуемой системы (таблица 1).

Таблица 1. Основные физические характеристики исследуемой системы

Обозначение	Описание
$L_p(n)$	Общее ожидаемое число пересылок в сети размерности.
$L_p(k)$	Общее ожидаемое число пересылок, которое совершает один обыкновенный сенсор, находящийся на k -ом уровне удаленности от референсного.
T_{inf}	Время, затрачиваемое сенсором на сбор информации.
$T_s = N_{bit} / f_{bit}$	Время передачи сообщения и получения подтверждения о доставке.
T_w	Время ожидания и приема сообщений (прослушивания эфира).
T_c	Время от начала выполнения измерения (съема информации) до завершения доставки всех сообщений в шлюз (цикл работы сети).
T_0	Время, которое сеть находится в режиме сна (время между двумя циклами съема информации, во время которого сенсор не потребляет энергию).
$T = T_c + T_0$	Интервал, состоящий из цикла работы сети T_c и времени сна T_0 до следующего измерения.

3.1. Расчет времени жизни сенсоров. Зная начальную энергию батареи E_0 и мощность P_k , потребляемую сенсором на k -ом уровне удаленности, можно приблизительно оценить время жизни сенсора (узла сети) как

$$t_k = \frac{E_0}{P_k}. \quad (5)$$

Интервал работы сенсора T состоит из времени T_{inf} , во время которого он тратит энергию E_k^{inf} на сбор информации, общего времени $L_p(k)T_s$ на $L_p(k)$ пересылок сообщений, при которых тратится энергия E_k^s , времени прослушивания эфира T_w при котором тратится энергия E_k^w на прием сообщений и ожидание, и время T_0 , которое сеть находится в режиме сна (время между двумя циклами съема информации, во время которого сенсор не потребляет энергию), так что

$$T = T_c + T_0 = T_{inf} + L_p(k)T_s + T_w + T_0,$$

то есть общая затраченная за цикл энергия E_k определяется как

$$E_k = E_k^{inf} + E_k^s + E_k^w. \quad (6)$$

В режиме сна энергия сенсором не тратится, поэтому это слагаемое в формуле (6) равно нулю.

Запишем выражение для общей энергии, затрачиваемой сенсором за цикл работы T_c :

$$E_k = P_k T_c = P_{inf} T_{inf} + L_p(k) P_s T_s + P_w T_w. \quad (7)$$

Учтем, что $P_{inf} \approx P_w$, а время съема информации и прослушивания эфира $T_{inf} + T_w$ может быть вычислено как время, не занятое пересылками сообщений

$$T_{inf} + T_w = T_c - L_p(k)T_s. \quad (8)$$

Из формул (5), (7) и (8) несложно получить время, которое сенсор может провести в рабочих режимах съема информации, пересылок сообщений и прослушивания эфира на k -ом уровне удаленности:

$$t_p(k) = \frac{E_0 T_c}{L_p(k)P_s T_s + P_w(T_c - L_p(k)T_s)}. \quad (9)$$

Это время работы сенсора (без учета времени сна) будем называть временем жизни сенсора на k -ом уровне удаленности.

3.2. Расчет энергетических затрат. Пусть полное число пересылок на сети размерности $n \times n$ равно $L(n)$. При заданной вероятности доставки сообщения от сенсора ближайшему соседу равной p и возможности отправлять сообщения неограниченное число раз, математическое ожидание количества попыток передачи сообщения между соседними сенсорами, необходимое для успешной доставки, равно $1/p$. Общее ожидаемое число пересылок в сети размерности $n \times n$ определится выражением

$$L_p(n) = \frac{L(n)}{p}. \quad (10)$$

Если число референсных узлов равно m , то число обыкновенных сенсоров, а следовательно, и число сообщений, требующих отправки $S(n, m) = n^2 - m$.

Будем считать, что все сенсоры в сети равномерно распределены по кластерам, т.е. в каждом кластере есть один референсный и одинаковое количество обыкновенных сенсоров и уровней удаленности k_{max} . На каждом уровне сенсоры также разбиты по кластерам в среднем равномерно.

Пусть $l(p, k)$ – среднее число пересылок, необходимых для доставки одного сообщения с k -го уровня удаленности на референсный узел. Очевидно

$$l(p, k) = \frac{k}{p}.$$

Зная количество уровней k_{max} и количество сообщений, передаваемых через каждый уровень $S_k(n)$, $1 \leq k \leq k_{max}$, можно получить общую формулу для общего ожидаемого числа пересылок в сети:

$$L_p(n) = \sum_{k=1}^{k_{max}} S_k(n) \cdot \frac{k}{p}. \quad (11)$$

Сделаем еще одно допущение. Предположим, что в режиме ожидания и приема сообщения мощность пренебрежимо мала $P_w \approx 0$. Такое предположение позволяет не оценивать энергетические затраты на ожидание и прослушивание эфира. Полные энергетические затраты такой «идеальной» сети связаны только с пересылками сообщений

$$E_p(n) = L_p(n) P_s T_s. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что чем выше нагрузка сети, тем ближе рассматриваемая сеть к «идеальной», так как большая часть времени действительно тратится на передачу сообщений, а не на ожидание. Это снова приводит к необходимости рассматривать только высокую нагрузку сети.

3.3. Критерии оптимальности работы сети. Оценим предложенные выше расположения сенсоров в акватории – разбиение на подрешетки и обход периметра – с точки зрения двух критериев:

- *Энергоэффективности сети* – общих энергетических затрат на пересылку всех сообщений в шлюз за один цикл (чем ниже эти затраты, тем более эффективна сеть);
- *Времени жизни* референсных сенсоров t_{ref} и всей сети в целом.

4. Сравнение работы оптимизированных стационарной и гибридной ПБСС в акватории произвольного размера. Предполагается, что размер акватории может быть выбран любым. При этом имеется возможность разместить в акватории любое число сенсоров на любом расстоянии друг от друга, а, следовательно, обеспечить любую вероятность доставки сообщений в шлюз.

Для сравнения эффективности работы стационарной и гибридной ПБСС будем считать, что они расположены в одной и той же акватории (с одинаковыми свойствами среды) и имеют одинаковые характеристики:

- общее число сенсоров в акватории n^2 ;
- число референсных узлов m ;
- технические характеристики модемов.

4.1. Разбиение сети на равные подрешетки. Рассмотрим случай стационарной ПБСС, когда в центрах подрешеток расположены стационарные буи, собирающие сообщения с сенсоров своего кластера (своей подрешетки) и передающие их в центр обработки данных. Пусть сеть разбита на равные подрешетки одинаковой размерности (рисунок 2(а)). Будем считать, что каждая подрешетка имеет вид квадратной сетки $l \times l$ (где l – нечётное число) с референсным узлом, расположенным в центре. Предположим, что n^2 кратно l^2 , т.е. $n^2 = m \cdot l^2$ (m – число референсных узлов, будем считать, что оно четное для удобства сравнения с гибридной сетью).

Учтем, что из энергетических соображений, количество референсных узлов m предпочтительно выбирать порядка 5% от общего числа агентов в сети [52]

$$m \approx 0,05n^2.$$

С учетом сделанного предположения, число агентов на стороне подрешетки оказывается не зависящим от масштаба сети

$$l = \frac{n}{\sqrt{m}} = \frac{1}{\sqrt{0,05}} \approx 4,54$$

и может быть выбрано либо равным 4, либо 5. В данной работе, учитывая, что l – нечётное число, будет использоваться параметр разбиения на подрешетки $l = 5$.

Зависимость числа пересылок S_k через уровень k от длины стороны подрешетки l в общем случае может быть описана формулой:

$$S_k = 4m \min(k, l - k), \quad 1 \leq k \leq l - 1, \quad k_{\max} = l - 1, \quad l = 5.$$

Общее ожидаемое число пересылок в сети $L_p^{sub-latt}(n)$ при вероятности доставки p для оптимального параметра разбиения на подрешетки $l = 5$ определяется по формуле (11) как

$$L_p^{sub-latt}(n) = \frac{4n^2}{pl^2} \sum_{k=1}^{l-1} k \cdot \min(k, l-k) \Big|_{l=5} = \frac{12n^2}{5p}. \quad (13)$$

Подстановка полученного выражения (13) в формулу (12) дает возможность определить полные энергетические затраты на пересылку сообщений в сети.

Важно отметить тот факт, что общее ожидаемое число пересылок зависит в стационарной ПБСС только от двух параметров – от однократной вероятности доставки сообщения p и от размера сети n^2 .

Общее ожидаемое число пересылок, которое совершает один обыкновенный сенсор, находящийся на k -ом уровне удаленности от референсного определится выражением

$$L_p^{sub-latt}(k) = \frac{1}{S_k} \sum_{i=k}^{l-1} \frac{S_i}{p} = \frac{1}{\min(k, l-k)} \sum_{i=k}^{l-1} \frac{\min(i, l-i)}{p}. \quad (14)$$

Общее ожидаемое число пересылок через референсные узлы равно

$$L_p^{sub-latt}(k=0) = \frac{l^2}{p} \Big|_{l=5} = \frac{25}{p}. \quad (15)$$

Зная загруженность узлов, можно определить время их жизни и оценить время жизни всей сети подставив формулы (14) и (15) в формулу (9).

Важно отметить тот факт, что общее ожидаемое число пересылок на референсные узлы зависит в стационарной ПБСС только от одного параметра – от однократной вероятности доставки сообщения p .

Небольшое количество проектных параметров в стационарной сети уменьшает возможности для ее оптимизации.

4.2. Обход внутреннего контура. Рассмотрим случай гибридной ПБСС, когда референсные узлы расположены на некотором контуре, форма которого совпадает с формой периметра акватории. Мобильный шлюз, роль которого может выполнять волновой глайдер, обходит все референсные узлы по непрерывной замкнутой траектории. Пусть эта траектория имеет форму квадрата, причем центр квадрата совпадает с центром акватории.

В предположении, что n – чётное, определим количество контуров $\nu = n/2$. Пронумеруем эти контуры, начиная от центра акватории к ее периметру, и предположим, что референсные агенты находятся на μ -ом контуре, $1 \leq \mu \leq \nu$. Число референсных узлов будет равно

$$m = 4(2\mu - 1).$$

Рассматривая сети, в которых линейный размер n кратен 10 ($n = 10q$, $q \in \mathbb{N}$), найдем номер контура гибридной сети, который содержит такое же количество референсных узлов, как и рассмотренная выше стационарная модель разбиения на подрешетки, т.е.

$$4(2\mu - 1) = \frac{n^2}{25} = 4q^2, \quad q \in \mathbb{N}. \quad (16)$$

Решая уравнение (16) и округляя результат в большую сторону, получим номер контура μ :

$$\mu = \frac{q^2}{2} + \frac{1}{2}, \quad q \in \mathbb{N}.$$

Приведем таблицу соответствия стационарной и гибридной ПБСС с примерно равным числом референсных узлов (таблица 2).

По отношению к референсным узлам обычные сенсоры сети можно разделить на внешние (лежащие в области между контуром референсных узлов и внешним периметром акватории) и внутренние (лежащие внутри контура референсных узлов). Обозначим число уровней удалённости узлов от референсных k_{max} и количество

сообщений, передаваемых через каждый уровень S_k для внешних и внутренних сенсоров как k_{max}^{in} , S_k^{in} , k_{max}^{out} , S_k^{out} .

Таблица 2. Основные физические характеристики исследуемой системы

q	n	n^2	$m^{sub-latt}$	Номер контура μ	m^{count}
1	10	100	4	1	4
2	20	400	16	[2,5]=3	20
3	30	900	36	5	36
4	40	1600	64	[8,5]=9	68
5	50	2500	200	13	200

Определение k_{max}^{in} , S_k^{in} дает:

$$k_{max}^{in} = \mu - 1,$$

$$S_k^{in} = 4(2\mu - 2k - 1), 1 \leq k \leq k_{max}^{in}.$$

Величины же k_{max}^{out} , S_k^{out} определяются следующими формулами:

$$k_{max}^{out} = 2(v - \mu),$$

$$S_k^{out} = 4 \cdot \begin{cases} 2\mu + k - 1 & 1 \leq k \leq (v - \mu) \\ 2v - (2\mu + k - 1) & (v - \mu) + 1 \leq k \leq 2(v - \mu) \end{cases}.$$

Общее ожидаемое число пересылок в сети при чётном n в сети определим по формуле (11). Оно будет состоять из двух слагаемых (соответствующих внешней и внутренней областям акватории относительно контура референсных узлов):

$$L_p^{count}(n) = \sum_{k=1}^{\mu-1} S_k^{in} \cdot \frac{k}{p} + \sum_{k=1}^{2(v-\mu)} S_k^{out} \cdot \frac{k}{p}.$$

Упрощая, получим, что число пересылок зависит от трех параметров – от вероятности доставки p , от размерности сети n и от

контура μ , который определяет траекторию движения мобильного шлюза:

$$L_p^{count}(n, \mu) = \frac{4}{6p} \left((\mu - 1)\mu(2\mu - 1) + 6 \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - \mu \right) \left(1 + \frac{n}{2} - \mu \right) \right). \quad (17)$$

Подстановка полученной формулы (17) в формулу (12) дает полные энергетические затраты на пересылку сообщений.

Общее ожидаемое число пересылок, которое совершает один обыкновенный сенсор, находящийся на k -ом уровне удаленности от референсного определится выражением

$$L_p^{count}(k) = \frac{1}{S_k^{in} + S_k^{out}} \left(\sum_{i=k}^{\mu-1} \frac{S_i^{in}}{p} + \sum_{i=k}^{2(v-\mu)} \frac{S_i^{out}}{p} \right). \quad (18)$$

Общее ожидаемое число пересылок через референсные узлы равно

$$L_p^{count}(k=0) = \frac{n^2}{4(2\mu-1)p}. \quad (19)$$

Зная загруженность узлов, можно определить время их жизни и оценить время жизни всей сети подставив формулы (17) и (19) в формулу (9).

Получили, что общее ожидаемое число пересылок на референсные узлы зависит от трех параметров – от вероятности доставки p , от размерности сети n и от контура μ , который определяет траекторию движения мобильного шлюза.

Таким образом, в гибридной ПБСС появляется еще один параметр оптимизации – длина контура μ , который является траекторией движения мобильного шлюза.

Если мы будем искать оптимальный контур исходя из энергетических соображений, не принимая во внимание время съема информации в сети, то это легко сделать, найдя производную от $L_p^{count}(n, \mu)$ в формуле (17).

$$\frac{dL_p^{count}}{d\mu}(n, \mu) = 0.$$

Корень получающегося при этом квадратного уравнения и есть оптимальный контур $\mu = \mu_{opt}$:

$$\mu_{opt} \approx \frac{(\sqrt{3}-1)n+1}{2} \approx 0,366n + 0,5.$$

Полученные вероятностные оценки были использованы для проведения вычислительных экспериментов с целью сравнения функциональных характеристик стационарной и гибридной ПБСС. Результаты приведены ниже.

5. Результаты моделирования. Для вычислительных экспериментов были использованы следующие значения проектных параметров (таблица 3).

Таблица 3. Значения проектных параметров

Наименование проектного параметра	Обозначение, единица измерения	Значение
Длина сообщения	N_{bit} , бит	256
Битовая скорость	f_{bit} , кбит/с	12,8
Несущая частота модема	f , кГц	60
Полоса пропускания	B , кГц	30
Мощность модема в режиме отправки сообщения	P_s , Вт	25
Мощность модема в режиме приема сообщения	P_r , Вт	0,3
Мощность модема в режиме ожидания	P_w , Вт	0,3
Мощность модема в режиме сбора информации (замера характеристик среды)	P_{inf} , Вт $P_{inf} \approx P_w$	0,3
Энергетическая емкость батареи напряжением 12 В	E_0 , кДж	864

Указанные в таблице параметры соответствуют параметрам используемых на практике модемов [53].

Подставляя указанные выше значения параметров в выражение (9) и переводя время в часы, получим формулу, позволяющую оценить

время жизни сенсоров $t_p(k)$ на любом уровне удаленности k от референсного

$$t_p(k) = \frac{240}{0,49L_p(k)/T_c + 0,3}. \quad (20)$$

Из формулы (20) видно, что при $0,49L_p(k)/T \ll 0,3$ время жизни сенсора на данном уровне удаленности перестает зависеть от числа передаваемых пакетов, и стремится к 800 часам. Назовем такой случай режимом низкой загрузки сенсора, а режим, при котором выполнено $4,94L_p(k)/T \approx 0,3$, режимом высокой загрузки. Если референсный агент работает в режиме низкой загрузки, то время его жизни будет очень мало зависеть от его расположения в акватории. По этой причине для исследования времени жизни рассматривается только высокая загрузка сети. В модельном исследовании, при сравнении вариантов расположения сенсорных узлов рассматривается цикл продолжительностью $T_c = 120$ с.

Будем считать, что вероятность лежит в широком диапазоне изменения $0,5 < p < 1$.

В рамках сделанных допущений ниже приводятся результаты вычислительных экспериментов, позволяющих определить оптимальный тип размещения сенсоров для различных размеров сети.

5.1. Полные ожидаемые энергетические затраты в стационарной ПБСС. Использование вероятностной оценки (12) для стационарной ПБСС позволили определить полные энергетические затраты на пересылку сообщений. Эти результаты показаны на рисунке 3. Видно, что энергетические затраты сети монотонно растут в зависимости от ее размера при любых заданных вероятностях доставки сообщения p .

При заданном размере сети n^2 и выбранном количестве референсных узлов 5% от общего количества, дальнейшая оптимизация энергоэффективности в такой модели оказывается невозможной. Чем больше размер сети n^2 , тем больше оказываются энергозатраты.

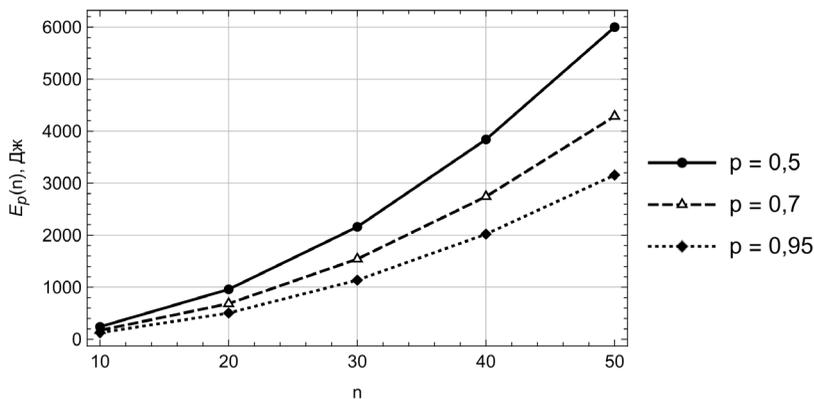


Рис. 3. Зависимость полных энергетических затрат $E_p(n)$ от линейного размера сети n в случае размещения референсных узлов в центрах подрешеток при различных вероятностях доставки сообщения p

5.2. Время жизни референсных узлов в стационарной ПБСС.

Зная загруженность узлов, можно определить время их жизни и оценить время жизни всей сети используя формулу (20). Результаты численных оценок показаны на рисунке 4.

Размер сети n^2 в данном случае не влияет на время жизни сенсоров. Достаточно рассмотреть одну произвольную подрешетку с заданной длиной стороны $l = 5$.

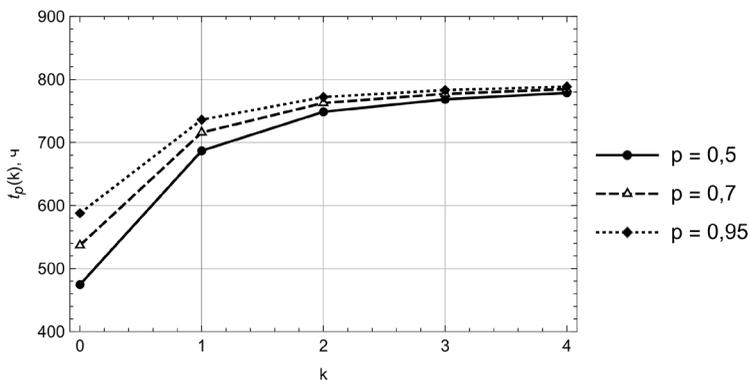


Рис. 4. Время жизни сенсоров $t_p(k)$ на разных уровнях удаленности k от референсного агента, расположенного в центре подрешетки из 25 сенсоров при длительности цикла $T_c = 120$ с

На рисунке 4 показано как изменяется время жизни сенсоров в зависимости от их удаленности от референсных узлов при длительности цикла $T_c = 120$ с.

Отметим, что для подрешетки со стороны $l = 5$ существует всего 4 уровня удаленности от референсного агента. Из графиков видно, что для уровней $k = 3$ и $k = 4$ время жизни оказывается близким к максимально возможному, равному 800 часам, что говорит о низкой загрузке этих сенсоров. Однако, для уровней 0, 1 и 2 время жизни заметно меньше, что говорит о том, что эти сенсоры выйдут из строя значительно раньше. Так, при вероятности доставки $p = 0,95$ время жизни референсного агента оказывается немного меньше 600 часов.

Эту несбалансированность стационарной сети сложно улучшить. Поскольку стационарные буи жестко связаны с расположением референсных узлов (которые находятся под ними), то после выхода референсных узлов из строя, связность сети будет нарушена. Необходимо физически переместить заякоренные буи и затем выполнить перестройку маршрутов передачи сообщений на новые выбранные референсные узлы. Процедура перемещения заякоренных буев на практике мало реализуема.

Перейдем к анализу гибридной сети.

5.3. Полные ожидаемые энергетические затраты в гибридной ПБСС. Использование вероятностной оценки (12) позволяет оценить полные энергетические затраты на пересылку сообщений в случае обхода внутреннего контура мобильным шлюзом. Для сетей с линейной размерностью $n = 2\nu$ можно рассмотреть движение шлюза по μ различным контурам, $1 \leq \mu \leq \nu$. Каждый контур характеризуется своими энергозатратами. Для наглядности на рисунке 5 представлена зависимость полных энергетических затрат за один цикл от номера контура μ при разных размерах сети для заданной вероятности доставки сообщения $p = 0,95$.

Из графиков (рисунок 5) видно, что кривые энергозатрат не монотонны, они имеют минимум, то есть для каждой сети существует контур оптимальной длины, при выборе которого в качестве референсного, энергозатраты будут минимальны. Однако, решаемая задача является многокритериальной и нельзя выбрать параметр обхода акватории не учитывая фактор времени. Исследование времени съема информации как параметра оптимизации будет исследовано в следующей работе.

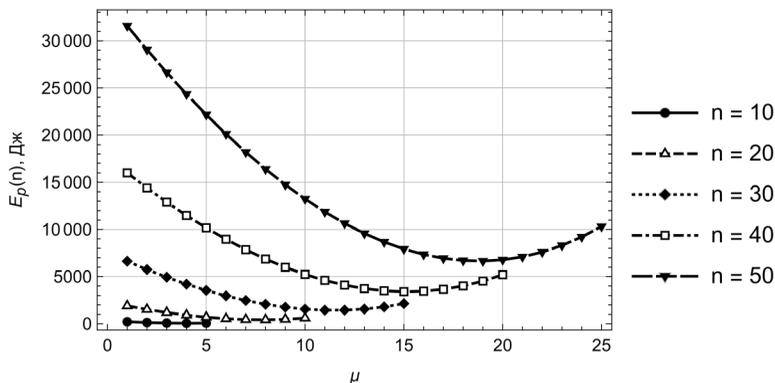


Рис. 5. Зависимость полных энергетических затрат $E_p(n)$ от номера контура μ в случае расстановки референсных узлов на внутреннем контуре при различных размерах сети n при вероятности доставки сообщения $p = 0,95$

В отличие от стационарного случая, появляется дополнительный параметр оптимизации μ , управление которым, совместно с учетом времени съема информации может улучшить энергоэффективность сети.

5.4. Время жизни референсных узлов в гибридной ПБСС.

Зная загруженность узлов, можно определить время их жизни и оценить время жизни всей сети используя формулу (20). Результаты численных оценок дали результат, который показан на графиках (рисунок 6 и рисунок 7). В данном случае размер сети n^2 оказывает существенное влияние на время жизни сенсоров. Поэтому, в отличие от стационарной сети, для гибридной было рассмотрено два случая – малая ($n = 10$) и большая ($n = 50$) сети.

На рисунке 6 для сети из 100 сенсоров показано как растет время жизни в зависимости от их удаленности от референсных узлов при длительности цикла $T_c = 120$ с. Из таблицы соответствия следует, что стационарную ПБСС для случая $n=10$ следует сравнивать с гибридной для $\mu=1$. Сравнение этих случаев на рисунке 5 и рисунке 6 показывает, что они дают приблизительно одинаковый результат около 600 часов. Однако, расстановка референсных узлов на других контурах с $\mu > 1$ может существенно увеличить время жизни. Так, при вероятности доставки $p = 0,95$ время жизни самого загруженного референсного агента на контуре $\mu = 3$ оказывается более

750 часов. Однако, необходимо иметь в виду, что это одновременно удлинит время съема информации мобильным шлюзом, что не всегда допустимо.

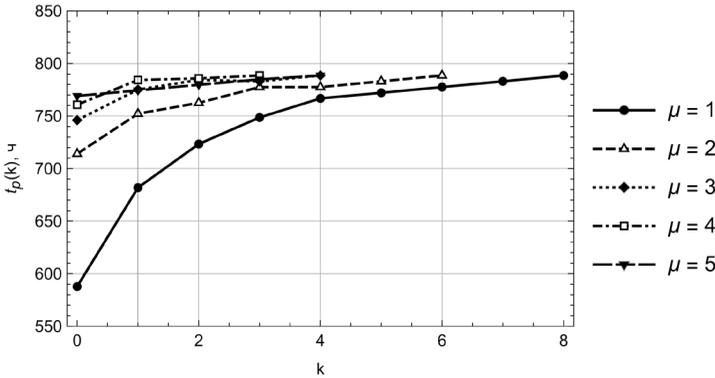


Рис. 6. Время жизни сенсоров $t_p(k)$ на разных уровнях удаленности от референсного агента в случае расстановки референсных узлов на замкнутых контурах μ акватории с вероятностью доставки сообщений $p = 0,95$ для сети из 100 сенсоров при длительности цикла $T_c = 120$ с

Теперь рассмотрим случай большой сети $n = 50$ (рисунок 7).

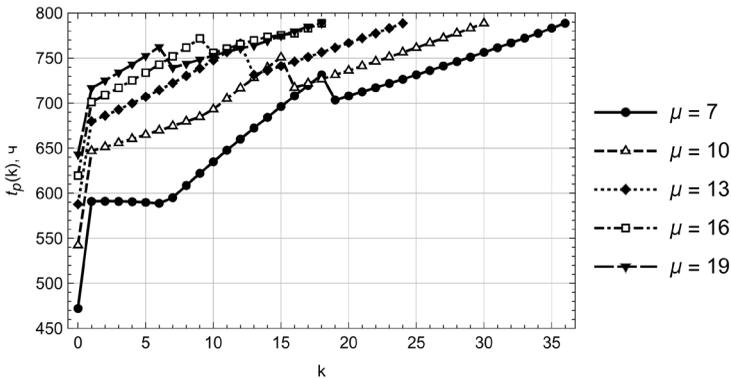


Рисунок 7. Время жизни сенсоров $t_p(k)$ на разных уровнях удаленности от референсного агента в случае расстановки референсных узлов на замкнутых контурах μ акватории с вероятностью доставки сообщений $p = 0,95$ для сети из 2500 сенсоров при длительности цикла $T_c = 120$ с

На рисунке 7 для сети из 2500 сенсоров показано как растет время жизни в зависимости от их удаленности от референсных узлов при длительности цикла $T_c = 120$ с.

Из таблицы соответствия (таблица 2) следует, что стационарную ПБСС для случая сети большой размерности – $n = 50$ следует сравнивать с гибридной ПБСС для $\mu = 13$.

Сравнение «точечной» линии в точке $k = 0$ на рисунке 4 и «штрихованной» линии с $\mu = 13$ в точке $k = 0$ на рисунке 7 показывает, что они дают приблизительно одинаковый результат по времени жизни референсного узла около 600 часов.

Причем расстановка референсных узлов на контурах с $\mu < 13$ ухудшает результат, а на контурах с $\mu > 13$ может существенно его улучшить. Из этого можно сделать вывод, что появление дополнительного параметра гибридной ПБСС, такого, как траектория обхода акватории позволяет дополнительно оптимизировать работу сети.

Кроме того, необходимо отметить, что в отличие от стационарной сети, в гибридной возможна динамическая перестройка маршрутов пересылки пакетов при уменьшении уровня заряда батарей референсных узлов до определенной критической величины. Т.е. назначение других узлов с достаточной энергией – референсными. При этом траектория движения мобильного шлюза будет согласована с положением новых референсных узлов.

6. Обсуждение результатов. Сравним между собой предложенные варианты размещения референсных узлов в акватории на стационарных и гибридных сетях различного размера при длительности цикла $T_c = 120$ с. Для моделирования работы сети и последующего сравнения была взята вероятность доставки $p = 0,95$, которая обеспечивает хорошую надежность работы сети.

Общее число сенсоров в акватории – n^2 , число референсных узлов составляет примерно 5% от общего числа сенсоров, выполнено условие $m^{sub-latt} \approx m^{count}$ (число референсных узлов в центрах подрешеток \approx числу референсных узлов на траектории движения мобильного шлюза). Для достижения этого соответствия найден соответствующий контур μ с равным числом референсных узлов.

Все выбранные технические характеристики модемов в стационарной и гибридной ПБСС одинаковы, также как и физические условия в акватории. Подстановка выбранных проектных значений в

полученные ранее формулы приводит к компактным аналитическим выражениям для энергетических затрат и времени жизни сети.

Для стационарной сети, для общих энергетических затрат при выбранных характеристиках получаем квадратичную зависимость от линейного размера сети n :

$$E_p^{sub-latt}(n) = 1,263n^2.$$

Время жизни референсного узла не зависит от размера сети, а определяется только количеством референсных узлов / подрешеток / кластеров / бுவ в акватории (у нас 5% от общего количества):

$$t_{ref}^{sub-latt} = 589 \text{ часов.}$$

Иначе дело обстоит с гибридной сетью. Тут важным параметров оптимизации оказывается траектория обхода мобильным шлюзом:

$$E_p^{count}(n) = 0,35 \left(3n \left(\frac{n}{2} - \mu + 1 \right) \left(\frac{n}{2} - \mu \right) + (2\mu - 1)(\mu - 1)\mu \right).$$

Энергозатраты зависят от размера сети как n^3 и, при неудачном выборе контура размещения референсных узлов будут расти очень быстро при росте n . Однако, несмотря на кубическую зависимость энергетических затрат от линейного размера сети n , рост энергозатрат можно компенсировать выбором оптимальной траектории обхода.

Время жизни референсного узла зависит как от размера сети, так и от траектории обхода, однако, учитывая оценку, которая следует из формулы (16) (с точностью до величины округления) $n^2 / (2\mu - 1) \approx 100$, получаем оценку для времени жизни референсного узла гибридной сети, которое находится в согласии с временем жизни в стационарной сети:

$$t_{ref}^{count} = \frac{2400}{0,01 \frac{n^2}{(2\mu - 1)} + 3} \approx 600 \text{ часов.}$$

При выбранных условиях в таблице 4 приведено сравнение полных энергетических затрат сети, связанных с пересылками

сообщений $E = E_p(n)$ и времени жизни референсных узлов $t_{ref} = t_p(0)$.

Таблица 4. Значения проектных параметров

Размер сети	Характеристики работы стационарной сети			Характеристики работы гибридной сети			
	число референсных узлов $m^{sub-latt}$	$E^{sub-latt}$	$t_{ref}^{sub-latt}$	μ	число референсных узлов m^{count}	E^{count}	t_{ref}^{count}
100	4	127	589	1	4	210	600
400	16	505	589	3	20	1186	631
900	36	1137	589	5	36	3528	600
1600	64	2021	589	9	68	5972	609
2500	200	3158	589	13	200	9555	600

Из анализа результатов, приведенных в таблице 4, следует, что время жизни сети является величиной, зависящей в основном от размера кластера, передающего сообщения на один референсный узел, а не от размера сети и количества пересылок, требующихся для доставки сообщения. Поэтому, при одинаковом соотношении обычных и референсных узлов и стационарная, и гибридная сеть дают приблизительно одинаковые результаты.

Энергоэффективность существенно зависит от размера сети и количества пересылок по ней. В стационарной ПБСС, разбитой на подрешетки, энергозатраты растут по квадратичному закону с ростом линейного размера сети, а в гибридной – по кубическому.

7. Заключение. В работе выполнен сравнительный анализ основных функциональных характеристик стационарной (с закоренными буями) и гибридной (с мобильным шлюзом) ПБСС для различных вариантов размещения сенсорных узлов в акватории.

Математический аппарат, основанный на вероятностном подходе, позволил оценить характеристики рассмотренных коммуникационных архитектур ПБСС с энергетической точки зрения – определить общие энергетические затраты сети на пересылку сообщений и время жизни сенсоров сети.

Результаты моделирования функциональных характеристик сетей для рассмотренных коммуникационных архитектур позволили сделать несколько важных выводов.

Во-первых, время жизни сети является величиной, зависящей в основном от размера кластера. Поэтому, при одинаковом соотношении обычных и референсных узлов и стационарная, и гибридная сеть дают приблизительно одинаковые результаты времени жизни сенсоров на одинаковом расстоянии от референсных.

Во-вторых, расположение сенсоров, соответствующее стационарной ПБСС, обладает плохой сбалансированностью с точки зрения времени жизни сенсоров на разных уровнях удаленности от референсного. Поскольку стационарные буи жестко связаны с расположением референсных узлов (которые находятся под ними), то после выхода референсов из строя, связность сети будет нарушена. Необходимо физически переместить заякоренные буи и затем выполнить перестройку маршрутов передачи сообщений на новые выбранные референсные узлы.

Другим способом сохранения связности в стационарной ПБСС является увеличение числа подрешеток, т.е. числа заякоренных буешлюзов, однако это приведет к существенному увеличению стоимости сети.

Эти проблемы решаются проще в гибридной сети. В ней возможна динамическая перестройка маршрутов при уменьшении уровня заряда батарей референсных узлов, не дожидаясь полного нарушения связности сети. Для этого достаточно изменить траекторию движения мобильного шлюза.

Таким образом, коммуникационная архитектура гибридной ПБСС оказывается более гибкой и настраиваемой с точки зрения сохранения связности и увеличения времени жизни сети. Кроме того, не обладая явными преимуществами с точки зрения энергозатрат, она, тем не менее, допускает увеличение энергоэффективности при использовании дополнительного параметра оптимизации – траектории мобильного шлюза. И, наконец, с экономической точки зрения – гибридная сеть является более дешевым решением. Перечисленные факты говорят о преимуществах использования гибридной ПБСС, перед стационарной.

При этом мобильный элемент – волновой глайдер, выполняющий роль межсервного шлюза, по сравнению с другими робототехническими платформами, способен функционировать в акватории в течение продолжительного времени, зачастую превосходящего время жизни сети. Это говорит о перспективности его

использования для прикладных задач сбора, накопления и ретрансляции информации при реализации различных политик обслуживания ПБСС.

В рамках предложенной стохастической модели авторами были исследованы другие важные функциональные характеристики гибридной ПБСС – надежность, пропускная способность сети, задержки передачи пакетов и коэффициент их доставки, показывающие потенциальные возможности такой сети. Эти результаты не вошли в настоящую работу и будут представлены в отдельной статье.

Литература

1. Ryabinin V., Barbiere J., Haugan P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., Trois A., Fischer A., Arico S., Aarup T., Pissierssens P., Visbeck M., Enevoldsen H., Rigaud J. The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development // *Oceanobs'19: An Ocean of Opportunity*. 2019. vol. 6. DOI: 10.3389/fmars.2019.00470.
2. Mohsan S., Li Y., Sadiq M., Liang J., Khan M. Recent Advances, Future Trends, Applications and Challenges of Internet of Underwater Things (IoUT): A Comprehensive Review // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. no. 11. DOI: 10.3390/jmse11010124.
3. Nkenyereye L., Nkenyereye L., Ndibanje B. Internet of Underwater Things: A Survey on Simulation Tools and 5G-Based Underwater Networks // *Electronics*. 2024. vol. 13(3). DOI: 10.3390/electronics13030474.
4. Riser S., Freeland H., Roemmich D., et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array // *Nature Climate Change*. 2016. vol. 6. no. 2. pp. 145–153. DOI: 10.1038/NCLIMATE2872.
5. Crout R., Conlee D., Bernard L. National Data Buoy Center (NDBC) National Backbone Contributions to the Integrated Ocean Observation System (IOOS) // *OCEANS*. 2006. pp. 1–3. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.307073.
6. Ho T., Hagaseth M., Rialland A., et al. Internet of Things at Sea: Using AIS and VHF over Satellite in Remote Areas // *Proceedings of 7th Transport Research Arena (TRA 2018)*. Vienna, Austria. 2018. pp. 1–10. DOI: 10.5281/zenodo.1473565.
7. Oke P., Sakov P. Assessing the footprint of a regional ocean observing system // *Journal of Marine Systems*. 2012. vol. 105. pp. 30–51. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2012.05.009.
8. Barnes C., NEPTUNE Canada Team. Building the world's first regional cabled ocean observatory (NEPTUNE): Realities, challenges and opportunities // *OCEANS*. 2007. pp. 1–8. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449319.
9. Wallace D., et al. A Canadian contribution to an integrated Atlantic ocean observing system (IAOOS) // *Oceans – St. John's*. 2014. pp. 1–10. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003244.
10. Kaneda Y., Kawaguchi K., Araki E., Matsumoto H., Nakamura T., Kamiya S., Ariyoshi K., Hori T. Dense Ocean Floor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET) Around the Nankai trough Mega Thrust Earthquake Seismogenic Zone in Southwestern Japan –Part 2: Real Time Monitoring of the Seismogenic Zone // *Proceedings of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Honolulu, Hawaii, USA. 2009. vol. 43468. pp. 715–720. DOI: 10.1115/OMAE2009-79599.

11. Grund M., Freitag L., Preisig J., Ball K. The PLUSNet Underwater Communications System: Acoustic Telemetry for Undersea Surveillance // *OCEANS*. 2006. pp. 1–5. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.307036.
12. Felemban E., Shaikh F., Qureshi U.M., Sheikh A., Qaisar S. Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. vol. 11(11). DOI: 10.1155/2015/896832.
13. Fattah S., Gani A., Ahmedy I., Idris M., Targio Hashem I. A Survey on Underwater Wireless Sensor Networks: Requirements, Taxonomy, Recent Advances, and Open Research Challenges // *Sensors*. 2020. vol. 20(18). DOI: 10.3390/s20185393.
14. Brekhovskikh L., Lysanov Yu. *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 3rd Ed. // NY: Springer New York. 2003. 279 p.
15. Sandhiyaa S., Gomathy C. A Survey on underwater wireless sensor networks: challenges, requirements, and opportunities // *Proceedings of Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. Palladam, India. 2021. pp. 1417–1427. DOI: 10.1109/I-SMAC52330.2021.9640791.
16. Mahmood T., Akhtar F., Ur Rehman K., Ali S., Mokbal F. A Comprehensive Survey on the Performance Analysis of Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN) Routing Protocols // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2009. vol. 10. no. 5. pp. 590–600. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100576.
17. Khan A., Ali I., Ghani A., Khan N., Alsaqer M., Rahman A., Mahmood H. Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks: Taxonomy, Research Challenges, Routing Strategies and Future Directions // *Sensors*. 2018. vol. 18(5). DOI: 10.3390/s18051619.
18. Su X., Ullah I., Liu X., Choi D. A Review of Underwater Localization Techniques, Algorithms, and Challenges // *Journal of Sensors*. 2020. vol. 2020(1). DOI: 10.1155/2020/6403161.
19. Xing G., Chen Y., He L., Su W., Hou R., Li W., Zhang C., Chen X. Energy Consumption in Relay Underwater Acoustic Sensor Networks for NDN // *IEEE Access*. 2009. vol. 7. pp. 42694–42702. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907693.
20. Gupta S., Singh N. Underwater wireless sensor networks: a review of routing protocols, taxonomy, and future directions // *Journal of Supercomputing*. 2024. vol. 80. pp. 5163–5196. DOI: 10.1007/s11227-023-05646-w.
21. Gola K., Arya S. Underwater acoustic sensor networks: Taxonomy on applications, architectures, localization methods, deployment techniques, routing techniques, and threats: A systematic review // *Concurrency and Computational: Practice and Experience*. 2023. vol. 35. DOI: 10.1002/cpe.7815.
22. Shovon 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.
23. Pu W. A Survey of Localization Techniques for Underwater Wireless Sensor Networks // *Journal of Computing and Electronic Information Management*. 2023. vol. 11. no. 1. pp. 10–15. DOI: 10.54097/jceim.v11i1.9184.
24. Rani S., Anju, Sangwan A., Kumar K., Nisar K., Soomro T., Ibrahim A., Gupta M., Chand M., Khan S. A Review and Analysis of Localization Techniques in Underwater Wireless Sensor Networks // *Computers, Materials and Continua*. 2023. vol. 75. no. 3. pp. 5697–5715. DOI: 10.32604/cmc.2023.033007.
25. Li X., Xu X., Yan L., Zhao H. Zhang T. Energy-Efficient Data Collection Using Autonomous Underwater Glider: A Reinforcement Learning Formulation // *Sensors*. 2020. vol. 20. no. 13. DOI: 10.3390/s20133758.

26. Su Y., Zhang L., Li Y., Yao X. A Glider-Assist Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks with Trajectory Prediction Methods // IEEE Access. 2020. vol. 8. pp. 154560–154572. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3015856.
27. Lan H., Lv Y., Jin J., Li J., Sun D., Yang Z. Acoustical Observation with Multiple Wave Gliders for Internet of Underwater Things // IEEE Internet of Things Journal. 2021. vol. 8. no. 4. pp. 2814–2825. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3020862.
28. Никущенко Д.В., Рыжов В.А., Тряскин Н.В. Моделирование гидродинамических характеристик волнового глайдера // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов (г. Уфа, 19-24 августа 2019 г.). Уфа, ИПСМ РАН, 2019. С. 71–73.
29. Овчинников К.Д., Рыжов В.А., Сенишин А.А., Кожемякин И.В. Экспериментальное исследование ходовых характеристик волнового глайдера // XV Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления»: Сборник материалов (Ростов-на-Дону – Таганрог, 5-9 октября 2020). Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. 2020. С. 91–97.
30. Ghanem M., Mansoor A., Ahmad R. A systematic literature review on mobility in terrestrial and underwater wireless sensor networks // International Journal of Communication Systems. 2021. vol. 34. no. 10. DOI: 10.1002/dac.4799.
31. 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.
32. Alkindi Z., Alzeidi N., Arafehand B., Touzene A. Performance evolution of grid-based routing protocol for underwater wireless sensor networks under different mobile models // International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN). 2018. vol. 10. no. 1. pp. 13–25. DOI: 10.5121/ijwmn.2018.10102.
33. Janardanan Kartha J., Jacob L. Delay and Lifetime Performance of Underwater Wireless Sensor Networks with Mobile Element Based Data Collection // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. vol. 11. no. 5. DOI: 10.1155/2015/128757.
34. Jalaja M., Jacob L. On-demand data collection in sparse underwater acoustic sensor networks using mobile elements // Proceedings of the 10th International Conference on Wireless and Mobile Communication (ICWMC 2014). Seville, Spain. 2014. pp. 105–111.
35. Yoon S., Azad A., Oh H., Kim S. AURP: an AUV-aided underwater routing protocol for underwater acoustic sensor networks // Sensors. 2012. vol. 12. no. 2. pp. 1827–1845. DOI: 10.3390/s120201827.
36. Hollinger G., Choudhary S., Qarabaqi P., Murphy C., Mitra U., Sukhatme G., Stojanovic M., Singh H., Hover F. Underwater data collection using robotic sensor networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2012. vol. 30. no. 5. pp. 899–911. DOI: 10.1109/jsac.2012.120606.
37. Rahim M., Casari P., Guerra F., Zorzi M. On the performance of delay—tolerant routing protocols in underwater networks // Proceedings of OCEANS 2011 IEEE. Santander, Spain. 2011. pp. 1–7. DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003388.
38. Choudhary M., Goyal N. A rendezvous point-based data gathering in underwater wireless sensor networks for monitoring applications // International Journal of Communication System. 2022. vol. 35. no. 6. DOI: 10.1002/dac.5078.
39. Sharma S., Puthal D., Jena S., Zomaya A., Ranjan R. Rendezvous based routing protocol for wireless sensor networks with mobile sink // The Journal of Supercomputing. 2017. vol. 73. pp. 1168–1188. DOI: 10.1007/s11227-016-1801-0.

40. Cheng C., Li L. Data gathering problem with the data importance consideration in Underwater Wireless Sensor Networks // *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. vol. 78. pp. 300–312. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.10.010.
41. Maqsood H., Javaid N., Yahya A., Ali B., Khan Z., Qasim U. MobiL-AUV: AUV-aided localization scheme for underwater wireless sensor networks // *Proceedings of the 2016 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*. Fukuoka, Japan. 2016. pp. 170–175. DOI: 10.1109/IMIS.2016.140.
42. Favaro F., Casari P., Guerra F., Zorzi M. Data upload from a static underwater network to an AUV: Polling or random access? // *Proceedings of the IEEE OCEANS 2012*. Yeosu, Republic of Korea. 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263499.
43. Favaro F., Brolo L., Toso G., Casari P., Zorzi M. A study on remote data retrieval strategies in underwater acoustic networks // *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS Conference*. San Diego, USA. 2013. pp. 1–8.
44. Cai S., Zhu Y., Wang T., Xu G., Liu A., Liu X. Data Collection in Underwater Sensor Networks based on Mobile Edge Computing // *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 6535–65367. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2918213.
45. Yan J., Yang X., Luo X., Chen C. Energy-efficient data collection over AUV-assisted underwater acoustic sensor network // *IEEE Systems Journal*. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3519–3530. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2789283.
46. Khan M., Ahmed S., Jembre Y., Kim D. An energy-efficient data collection protocol with AUV path planning in the Internet of Underwater Thing // *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. vol. 135. pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.jnca.2019.02.025.
47. Li H., Wu X., Zhang Z., Tan X., Pan J., Dai C., Luo D., Ahmed A., Xu Y. An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks // *iScience*, 2022. vol. 25. no. 8. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104738.
48. Fedorova T., Ryzhov V., Semenov N, Sulaiman S. (2022) Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway // *J. Marine. Sci. Appl.* 2022. vol. 21. pp. 179–196. DOI: 10.1007/s11804-022-00268-9.
49. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice* // Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1996. 656 p.
50. Thorp W. Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1965. vol. 38. no. 4. p. 648–654.
51. Ahn J., Syed A., Krishnamachari B., Heidemann J. Design and analysis of a propagation delay tolerant ALOHA protocol for underwater networks // *Ad Hoc Networks*. 2011. vol. 9. pp. 752–766. DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.09.007.
52. Lindsey S., Raghavendra C. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems // *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. USA: Big Sky, 2002. vol. 3. DOI: 10.1109/AERO.2002.1035242.
53. Шарафудинова Т.К. Сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2021. № 13(6). С. 832–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

Федорова Татьяна Александровна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры, кафедра прикладной математики и математического моделирования факультета цифровых и промышленных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: теоретическая физика,

мультиагентные системы, моделирование сложных динамических систем, подводные беспроводные сенсорные сети. Число научных публикаций — 46. fedorova.tan@gmail.com; улица Лоцманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)495-2648.

Рыжов Владимир Александрович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра прикладной математики и математического моделирования факультета цифровых и промышленных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: морская робототехника, мультиагентные системы, гидродинамика. Число научных публикаций — 120. varyzhov@smtu.ru; улица Лоцманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)495-2648.

Сафронов Кирилл Сергеевич — старший преподаватель кафедры, кафедра прикладной математики и математического моделирования факультета цифровых и промышленных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: теория вероятности, математическая статистика, машинное обучение, математическая акустика, мультиагентные системы. Число научных публикаций — 12. safronov.kirill.pm@gmail.com; улица Лоцманская, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)495-2648.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» (договор № 075-15-2022-312 от 20.04.2022).

T. FEDOROVA, V. RYZHOV, K. SAFRONOV
**THE USE OF HYBRID COMMUNICATION ARCHITECTURE IN
UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS TO ENHANCE
THEIR LIFETIME AND EFFICIENCY**

Fedorova T., Ryzhov V., Safronov K. The Use of Hybrid Communication Architecture in Underwater Wireless Sensor Networks to Enhance Their Lifetime and Efficiency.

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the main functional characteristics of underwater wireless sensor networks (UWSNs) with stationary and hybrid communication architectures. The UWSNs consist of sensor nodes located on the seabed and intermodal gateways facilitating the transmission of information packets between the underwater and above-water segments of the network. In the stationary UWSNs, anchored buoys serve as gateways, while in the hybrid UWSNs, mobile transport platforms fulfill this role. Using a mathematical framework based on a probabilistic approach, an evaluation of the functional characteristics of alternative communication architectures for UWSNs is performed from an energy perspective. The overall energy consumption of the network for message transmission and the sensor network's lifespan are determined. or the numerical analysis of the functional characteristics of UWSNs, a wide range of design parameters is considered, such as the size of the water area, the required number and placement options of sensor nodes, and the packet delivery probability in the water area (physical parameters of the environment). The search for "optimal" solutions from an energy standpoint is conducted within these parameter ranges. The conducted research demonstrates that mobility plays a crucial role in improving the functioning of underwater networks in terms of coverage (ensuring connectivity), energy efficiency, and lifetime. The mobile element, represented by the wave glider acting as an intermodal gateway, is capable of sustained operation in the water area for an extended period, indicating its potential for practical tasks such as data collection, storage, and information relay within the context of the Internet of Underwater Things.

Keywords: underwater wireless sensor networks, hybrid networks, mobile intermodal gateway, hydroacoustic communication, network efficiency criterion, network lifetime.

References

1. Ryabinin V., Barbieri J., Haugan P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., Troisi A., Fischer A., Arico S., Aarup T., Pissierssens P., Visbeck M., Enevoldsen H., Rigaud J. The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development. Oceanobs'19: An Ocean of Opportunity. 2019. vol. 6. DOI: 10.3389/fmars.2019.00470.
2. Mohsan S., Li Y., Sadiq M., Liang J., Khan M. Recent Advances, Future Trends, Applications and Challenges of Internet of Underwater Things (IoUT): A Comprehensive Review. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. no. 11. DOI: 10.3390/jmse11010124.
3. Nkenyereye L., Nkenyereye L., Ndibanje B. Internet of Underwater Things: A Survey on Simulation Tools and 5G-Based Underwater Networks. Electronics. 2024. vol. 13(3). DOI: 10.3390/electronics13030474.
4. Riser S., Freeland H., Roemmich D., et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. Nature Climate Change. 2016. vol. 6. no. 2. pp. 145–153. DOI: 10.1038/NCLIMATE2872.

5. Crout R., Conlee D., Bernard L. National Data Buoy Center (NDBC) National Backbone Contributions to the Integrated Ocean Observation System (IOOS). OCEANS. 2006. pp. 1–3. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.307073.
6. Ho T., Hagaseth M., Rialland A., et al. Internet of Things at Sea: Using AIS and VHF over Satellite in Remote Areas. Proceedings of 7th Transport Research Arena (TRA 2018). Vienna, Austria. 2018. pp. 1–10. DOI: 10.5281/zenodo.1473565.
7. Oke P., Sakov P. Assessing the footprint of a regional ocean observing system. Journal of Marine Systems. 2012. vol. 105. pp. 30–51. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2012.05.009.
8. Barnes C., NEPTUNE Canada Team. Building the world’s first regional cabled ocean observatory (NEPTUNE): Realities, challenges and opportunities. OCEANS. 2007. pp. 1–8. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449319.
9. Wallace D., et al. A Canadian contribution to an integrated Atlantic ocean observing system (IAOOS). Oceans – St. John’s. 2014. pp. 1–10. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003244.
10. Kaneda Y., Kawaguchi K., Araki E., Matsumoto H., Nakamura T., Kamiya S., Ariyoshi K., Hori T. Dense Ocean Floor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET) Around the Nankai trough Mega Thrust Earthquake Seismogenic Zone in Southwestern Japan –Part 2: Real Time Monitoring of the Seismogenic Zone. Proceedings of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Honolulu, Hawaii, USA. 2009. vol. 43468. pp. 715–720. DOI: 10.1115/OMAE2009-79599.
11. Grund M., Freitag L., Preisig J., Ball K. The PLUSNet Underwater Communications System: Acoustic Telemetry for Undersea Surveillance. OCEANS. 2006. pp. 1–5. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.307036.
12. Felemban E., Shaikh F., Qureshi U.M., Sheikh A., Qaisar S. Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. vol. 11(11). DOI: 10.1155/2015/896832.
13. Fattah S., Gani A., Ahmedy I., Idris M., Targio Hashem I. A Survey on Underwater Wireless Sensor Networks: Requirements, Taxonomy, Recent Advances, and Open Research Challenges. Sensors. 2020. vol. 20(18). DOI: 10.3390/s20185393.
14. Brekhovskikh L., Lysanov Yu. Fundamentals of Ocean Acoustics, 3rd Ed. NY: Springer New York. 2003. 279 p.
15. Sandhiyaa S., Gomathy C. A Survey on underwater wireless sensor networks: challenges, requirements, and opportunities. Proceedings of Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). Palladam, India. 2021. pp. 1417–1427. DOI: 10.1109/I-SMAC52330.2021.9640791.
16. Mahmood T., Akhtar F., Ur Rehman K., Ali S., Mokbal F. A Comprehensive Survey on the Performance Analysis of Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN) Routing Protocols. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2009. vol. 10. no. 5. pp. 590–600. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100576.
17. Khan A., Ali I., Ghani A., Khan N., Alsaqer M., Rahman A., Mahmood H. Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks: Taxonomy, Research Challenges, Routing Strategies and Future Directions. Sensors. 2018. vol. 18(5). DOI: 10.3390/s18051619.
18. Su X., Ullah I., Liu X., Choi D. A Review of Underwater Localization Techniques, Algorithms, and Challenges. Journal of Sensors. 2020. vol. 2020(1). DOI: 10.1155/2020/6403161.
19. Xing G., Chen Y., He L., Su W., Hou R., Li W., Zhang C., Chen X. Energy Consumption in Relay Underwater Acoustic Sensor Networks for NDN. IEEE Access. 2009. vol. 7. pp. 42694–42702. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907693.

20. Gupta S., Singh N. Underwater wireless sensor networks: a review of routing protocols, taxonomy, and future directions. *Journal of Supercomputing*. 2024. vol. 80. pp. 5163–5196. DOI: 10.1007/s11227-023-05646-w.
21. Gola K., Arya S. Underwater acoustic sensor networks: Taxonomy on applications, architectures, localization methods, deployment techniques, routing techniques, and threats: A systematic review. *Concurrency and Computational: Practice and Experience*. 2023. vol. 35. DOI: 10.1002/cpe.7815.
22. Shovon 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.
23. Pu W. A Survey of Localization Techniques for Underwater Wireless Sensor Networks. *Journal of Computing and Electronic Information Management*. 2023. vol. 11. no. 1. pp. 10–15. DOI: 10.54097/jceim.v11i1.9184.
24. Rani S., Anju, Sangwan A., Kumar K., Nisar K., Soomro T., Ibrahim A., Gupta M., Chand M., Khan S. A Review and Analysis of Localization Techniques in Underwater Wireless Sensor Networks. *Computers, Materials and Continua*. 2023. vol. 75. no. 3. pp. 5697–5715. DOI: 10.32604/cmc.2023.033007.
25. Li X., Xu X., Yan L., Zhao H. Zhang T. Energy-Efficient Data Collection Using Autonomous Underwater Glider: A Reinforcement Learning Formulation. *Sensors*. 2020. vol. 20. no. 13. DOI: 10.3390/s20133758.
26. Su Y., Zhang L., Li Y., Yao X. A Glider-Assist Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks with Trajectory Prediction Methods. *IEEE Access*. 2020. vol. 8. pp. 154560–154572. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3015856.
27. Lan H., Lv Y., Jin J., Li J., Sun D., Yang Z. Acoustical Observation with Multiple Wave Gliders for Internet of Underwater Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. vol. 8. no. 4. pp. 2814–2825. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3020862.
28. Nikushchenko D., Ryzhov V., Triaskin N. [Modeling the hydrodynamic characteristics of a wave glider] XII Vserossijskij s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoj i prikladnoj mehaniki: Sbornik trudov [XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Collected papers]. Ufa., IPSM RAN, 2019. pp. 71–73. (In Russ.).
29. Ovchinnikov K., Ryzhov V., Sinishin A., Kozhemiakin I. [Experimental study of the performance characteristics of a wave glider] XV Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija»: Sbornik materialov [XV All-Russian Scientific and Practical Conference "Promising Systems and Control Problems": Collected materials]. Rostov-na-Donu – Taganrog: Izd-vo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2020. pp. 91–97. (In Russ.).
30. Ghanem M., Mansoor A., Ahmad R. A systematic literature review on mobility in terrestrial and underwater wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*. 2021. vol. 34. no. 10. DOI: 10.1002/dac.4799.
31. 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.
32. Alkindi Z., Alzeidi N., Arafehhand B., Touzene A. Performance evolution of grid-based routing protocol for underwater wireless sensor networks under different mobile models. *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*. 2018. vol. 10. no. 1. pp. 13–25. DOI: 10.5121/ijwmn.2018.10102.
33. Janardanan Kartha J., Jacob L. Delay and Lifetime Performance of Underwater Wireless Sensor Networks with Mobile Element Based Data Collection. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. vol. 11. no. 5. DOI: 10.1155/2015/128757.

34. Jalaja M., Jacob L. On-demand data collection in sparse underwater acoustic sensor networks using mobile elements. Proceedings of the 10th International Conference on Wireless and Mobile Communication (ICWMC 2014). Seville, Spain. 2014. pp. 105–111.
35. Yoon S., Azad A., Oh H., Kim S. AURP: an AUV-aided underwater routing protocol for underwater acoustic sensor networks. *Sensors*. 2012. vol. 12. no. 2. pp. 1827–1845. DOI: 10.3390/s120201827.
36. Hollinger G., Choudhary S., Qarabaqi P., Murphy C., Mitra U., Sukhatme G., Stojanovic M., Singh H., Hover F. Underwater data collection using robotic sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2012. vol. 30. no. 5. pp. 899–911. DOI: 10.1109/jsac.2012.120606.
37. Rahim M., Casari P., Guerra F., Zorzi M. On the performance of delay-tolerant routing protocols in underwater networks. Proceedings of OCEANS 2011 IEEE. Santander, Spain. 2011. pp. 1–7. DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003388.
38. Choudhary M., Goyal N. A rendezvous point-based data gathering in underwater wireless sensor networks for monitoring applications. *International Journal of Communication System*. 2022. vol. 35. no. 6. DOI: 10.1002/dac.5078.
39. Sharma S., Puthal D., Jena S., Zomaya A., Ranjan R. Rendezvous based routing protocol for wireless sensor networks with mobile sink. *The Journal of Supercomputing*. 2017. vol. 73. pp. 1168–1188. DOI: 10.1007/s11227-016-1801-0.
40. Cheng C., Li L. Data gathering problem with the data importance consideration in Underwater Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. vol. 78. pp. 300–312. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.10.010.
41. Maqsood H., Javadi N., Yahya A., Ali B., Khan Z., Qasim U. MobiL-AUV: AUV-aided localization scheme for underwater wireless sensor networks. Proceedings of the 2016 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS). Fukuoka, Japan. 2016. pp. 170–175. DOI: 10.1109/IMIS.2016.140.
42. Favaro F., Casari P., Guerra F., Zorzi M. Data upload from a static underwater network to an AUV: Polling or random access? Proceedings of the IEEE OCEANS 2012. Yeosu, Republic of Korea. 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263499.
43. Favaro F., Brolo L., Toso G., Casari P., Zorzi M. A study on remote data retrieval strategies in underwater acoustic networks. Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS Conference. San Diego, USA. 2013. pp. 1–8.
44. Cai S., Zhu Y., Wang T., Xu G., Liu A., Liu X. Data Collection in Underwater Sensor Networks based on Mobile Edge Computing. *IEEE Access*. 2019. vol. 7. pp. 6535–65367. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2918213.
45. Yan J., Yang X., Luo X., Chen C. Energy-efficient data collection over AUV-assisted underwater acoustic sensor network. *IEEE Systems Journal*. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3519–3530. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2789283.
46. Khan M., Ahmed S., Jembre Y., Kim D. An energy-efficient data collection protocol with AUV path planning in the Internet of Underwater Thing. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. vol. 135. pp. 20–31. DOI: 10.1016/j.jnca.2019.02.025.
47. Li H., Wu X., Zhang Z., Tan X., Pan J., Dai C., Luo D., Ahmed A., Xu Y. An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. *iScience*, 2022. vol. 25. no. 8. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104738.
48. Fedorova T., Ryzhov V., Semenov N, Sulaiman S. (2022) Optimization of an Underwater Wireless Sensor Network Architecture with Wave Glider as a Mobile Gateway. *J. Marine. Sci. Appl.* 2022. vol. 21. pp. 179–196. DOI: 10.1007/s11804-022-00268-9.

49. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1996. 656 p.
50. Thorp W. Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1965. vol. 38. no. 4. p. 648–654.
51. Ahn J., Syed A., Krishnamachari B., Heidemann J. Design and analysis of a propagation delay tolerant ALOHA protocol for underwater networks. *Ad Hoc Networks*. 2011. vol. 9. pp. 752–766. DOI: 10.1016/j.adhoc.2010.09.007.
52. Lindsey S., Raghavendra C. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. USA: Big Sky, 2002. vol. 3. DOI: 10.1109/AERO.2002.1035242.
53. Sharafutdinova T. [Comparative analysis of industrial hydroacoustic modems]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova – Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2021. no. 13(6). pp. 832–841. (In Russ.). DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

Fedorova Tatiana — Ph.D., Associated professor of the department, Department of applied mathematics and mathematical modeling, faculty of digital industrial technologies, St. Petersburg State Marine Technical University. Research interests: theoretical physics, multiagent systems, complex dynamic systems modeling, underwater wireless sensor network. The number of publications — 46. fedorova.tan@gmail.com; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)495-2648.

Ryzhov Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of the department, Department of applied mathematics and mathematical modeling, faculty of digital industrial technologies, St. Petersburg State Marine Technical University. Research interests: marine robotics, multiagent systems, hydrodynamics. The number of publications — 120. varyzhov@smtu.ru; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)495-2648.

Safronov Kirill — Assistant professor of the department, Department of applied mathematics and mathematical modeling, faculty of digital industrial technologies, St. Petersburg State Marine Technical University. Research interests: probability theory, mathematical statistics, machine learning, mathematical acoustics, multiagent systems. The number of publications — 12. safronov.kirill.pm@gmail.com; 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)495-2648.

Acknowledgements. The research is partially funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the World-class Research Center Program: Advanced Digital Technologies (contract No. 075-15-2022-312 dated 20 April 2022).