

К. Г. КЕБКАЛ, В. К. КЕБКАЛ, А. Г. КЕБКАЛ, Д. Д. МИНАЕВ,
Р. В. ЛЕОНЕНКОВ, А. С. КОРЫТКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОЙ ПОДВОДНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ С ПРОГРАММНЫМ КАРКАСОМ EviNS

Представлено новое техническое решение, позволяющее существенно снизить затраты на создание и эксплуатацию гидроакустических (ГА) сенсорных сетей, а также сохранить малые габариты и высокую энергоэффективность каждого из узлов сети (модемов, выполняющих, например, функции сетевых устройств связи, узлов донной антенны с длинной базой и прочее). Приведены показатели производительности ГА-сети в режиме, представляющем интерес, в частности, для позиционирования и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов: исследованы задержки распространения небольших пакетов данных в ГА-сети, а также вероятности доставки небольших пакетов данных от их источника до конечного получателя (к примеру, команд управления, сенсорных данных, данных о позициях длиннотазовых узлов, синхропоследовательностей).

Решение основано на разработке и включении в состав программно-аппаратной платформы гидроакустического модема ГА-модема специализированного программного каркаса EviNS (Evologics intelligent Networking Software Framework), представляющего собой компактное программное обеспечение (ПО).

Продемонстрированы результаты экспериментального исследования показателей производительности цифровой ГА-сети, в которой используется часть протоколов программного каркаса EviNS, а именно комбинация протокола неkoordinированного доступа к среде и протокола маршрутизации, основанного на алгоритме «затопления» сети с управлением по порядковому номеру (контролем номеров пакетов данных и ретранслирующих узлов сети).

Полученные в экспериментах значения вероятностей и задержек доставки данных от источника до конечного получателя предоставляют пользователю сети необходимые сведения для планирования задач по групповому взаимодействию и оперативной координации узлов ГА-сети, в частно-

Кебкал Константин Георгиевич. Доктор технических наук, старший научный сотрудник, Evologics GmbH (Берлин, Германия).

Кебкал Вероника Константиновна. Evologics GmbH.

Кебкал Алексей Георгиевич. Evologics GmbH.

Минаев Дмитрий Дмитриевич. Кандидат технических наук, доцент, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН) (Южно-Сахалинск, Россия).

Леоненков Роман Викторович. СКБ САМИ ДВО РАН.

Корытко Андрей Семенович. СКБ САМИ ДВО РАН.

сти мобильных узлов на подводных аппаратах (по крайней мере, в ГА-сетях с конфигурацией и размерами, аналогичными приведенным в статье).

Ключевые слова: цифровая подводная сеть, гидроакустический модем, EviNS, вероятность доставки.

Введение

Технологии передачи цифровой информации под водой становятся все более востребованными. Подводные сенсорные сети в толще воды или на дне, распределенные на обширной акватории, во многих приложениях требуют согласованной работы и в связи с этим оперативного обмена данными между собой. Для организации доступа к данным измерений подводной сенсорной сети в режиме реального времени сенсоры могут оснащаться средствами цифровой связи. Необитаемые подводные аппараты, действующие в группе, требуют интенсивного обмена навигационными данными при совместном маневрировании, выполнения согласованных измерений, возможности модификации/уточнения миссии с оператором на сопровождающем плавсредстве, определения/уточнения своего местоположения по геопривязанным мобильным или стационарным узлам гидроакустических антенн.

Решение таких задач предполагает включение ГА-модемов в состав сенсорных модулей, антенн или подводных аппаратов. Вместе с тем при сегодняшнем состоянии технологий цифровой подводной связи эффективное применение ГА-модемов возможно лишь в случае очень небольшого числа асинхронно взаимодействующих источников/получателей данных. При одновременной работе нескольких ГА-модемов в районе взаимного покрытия могут возникать коллизии пакетов данных, поступающих на прием от нескольких источников, что приводит к потерям части или всей информации пакетов. С ростом числа одновременно работающих ГА-модемов вероятность таких коллизий повышается и делает их работу неэффективной или даже невозможной.

С другой стороны, с увеличением размера сети и/или при работе в условиях неблагоприятной гидрологии часть ГА-модемов сети, например выполняющих функции источников данных, могут оказываться за пределами радиусов действия ГА-модемов – получателей данных. Обмен данными между отдельными узлами или частями сети, не имеющими непосредственной связи друг с другом, обеспечиваться не будет.

В радиосвязи известно множество методов как разрешения коллизий данных при одновременной работе модемов в сети, так и маршрутизации данных в сети через промежуточные узлы между ее несвязанными частями [1, 2, 3, 4]. Но в гидроакустике они могут применяться не всегда и, как правило, с большими ограничениями [5, 6, 7].

Доработке существующих и разработке новых методов доступа ГА-модема к среде распространения, разрешения коллизий и маршрутизации данных в последнее время посвящен ряд публикаций [5, 8]. Тем не менее практическое использование разработанных по эти методам протоколов управления доступом к среде и протоколов маршрутизации связано с необходимостью создания в дополнение к ГА-модему сторонней аппаратной платформы и стороннего ПО. В результате процесс создания цифровой ГА-сети оказывался весьма затратным, а полученное техническое решение – громоздким и энергетически неэффективным.

В данной статье представлено техническое решение, позволяющее существенно снизить затраты на создание ГА-сети, а также сохранить малые габариты и высокую энергоэффективность ее узлов (модемов, выполняющих сетевые функции).

Идея этого решения состоит во включении в состав ГА-модема специализированного программного каркаса, запускаемого непосредственно на его аппаратной платформе и содержащего программные модули, реализующие протоколы управления доступом к среде и протоколы маршрутизации данных. Такой специализированный каркас EviNS [9] был разработан компанией Evologics. Он представляет собой компактное ПО с открытым исходным кодом, разработанное на языке программирования Erlang. Программный каркас EviNS нетребователен к вычислительным ресурсам и, функционируя непосредственно на аппаратной платформе ГА-модема, может рассматриваться как часть его стандартного ПО.

Целью работы является экспериментальное подтверждение эффективности новой технологии организации подводной сенсорной сети, основанной на использовании ГА-модема, оснащенных специализированным программным каркасом EviNS.

Описание технологии

Пользователь ГА-модема может сам установить программы управления доступом к среде и маршрутизации в состав EviNS – как собственные, так и предлагаемые разработчиком EviNS, все они имеют открытый исходный код и при необходимости свободно модифицируются пользователем.

На данный момент в состав исходного набора программ управления доступом к среде в EviNS входят:

- протокол управления с неординарным доступом к среде CSMA-Aloha – Carrier-Sense Multiple Access-Aloha [10] в виде усовершенствованного (для применения в ГА-сети) протокола Aloha, широко распространенного в радиосвязи [11];
- протокол управления доступом к среде с резервированием канала путем конкурентных запросов от множества узлов сети T-Lohi [12];
- несинхронный протокол управления доступом к среде, основанный на квитировании множества отдельных соединений между узлами сети Distance Aware Collision Avoidance Protocol – DACAP [13, 14].

Исходный набор программ маршрутизации в EviNS содержит:

- протокол, основанный на алгоритме «затопления» с управлением по порядковому номеру Sequence Number Controlled Flooding – SNCF [15];
- протокол, основанный на динамическом вероятностном «затоплении» Dynamic Probabilistic Flooding – DPFlood [16];
- протокол, основанный на обмене совмещенными пакетами со служебными данными и данными полезной нагрузки Information Carrying Based Routing Protocol – ICRP [17, 18].

Протоколы маршрутизации предполагают возможность обмена данными как с квитированием, так и без.

В статье в качестве примера представлены материалы экспериментов с ГА-сетью, способной выполнять задачи сетевого обмена небольшими пакетами данных, например командами управления автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), навигационными данными, данными сенсоров, текущей статусной информацией модулей АНПА.

Известно, что ГА-сеть с мобильными узлами (или стационарными узлами в среде с быстро изменяющейся гидрологией) могут оказаться по отношению друг к другу в чередующихся по интенсивности зонах акустической освещенности, в связи с этим временами возникают трудности с обменом данными – вплоть до полной потери соединения. По этой причине распространенным требованием к ГА-сети является наличие у нее способности к самоорганизации, а также к работе в условиях изменяющейся структуры и геометрии сети.

Рассматриваемая в этой статье цифровая ГА-сеть представляет собой динамическую ad-hoc сеть – децентрализованную беспроводную самоорганизующуюся из множества узлов, не имеющую постоянной структуры. В таком исполнении пользовательские устройства, в частности подводные сенсоры или аппараты, могут соединяться «на лету». Каждый узел сети способен пересылать (ретранслировать) данные, предназначенные другим узлам. При этом определение порядка пересылки данных производится динамически на основании связности сети.

Организация доставки сообщений между источником и получателем основана на методе «затопления» – Sequence Number Controlled Flooding (SNCF) [15], который состоит в ретрансляции данных узлами сети вида «возьми и передай дальше». Порядок некоординированного доступа к среде построен на адаптированном для применения в гидроакустике методе Carrier-Sense Multiple Access-Aloha (CSMA-Aloha) [11], который заключается в предварительном «прослушивании» акустической активности в гидроакустической среде с передачей данных в сеть в периоды отсутствия активности соседних узлов и с использованием псевдослучайных задержек передачи.

Организация обмена данными в ГА-сети

Предустановленный в составе программного каркаса EviNS и исполняемый на аппаратной платформе модема протокол управления доступом к среде CSMA-Aloha реализует предварительное прослушивание активности соседних узлов сети и передает в гидроакустическую среду пакеты данных в отсутствие такой активности. В случае обнаружения акустической активности «соседей» ГА-сеть переходит в режим отложенной передачи на псевдослучайное время.

CSMA-Aloha разработан на базе широко распространенного в радиосвязи протокола Aloha [11]. Усовершенствование было предложено в [10] и заключается в том, что перед передачей данных в гидроакустическую среду каждый узел сети в течение псевдослучайного интервала времени пытается определить, является ли среда распространения сигнала свободной от активности соседних узлов. Если среда занята, то передача пакета данных откладывается на псевдослучайное время, при необходимости многократно, до тех пор пока она не оказывается незанятой. Интервал передачи пакетов данных выбирается псевдослучайным во избежание попыток доступа к среде распространения несколькими узлами одновременно. Следует отметить, что использование протокола CSMA-Aloha в гидроакустической среде с типичным для радиоканала балансом между временем интервала «прослушивания» среды и размером пакета данных приводило бы к значительному снижению пропускной способности сети. По этой причине в гидроакустической среде используется сравнительно короткий интервал прослушивания, служащий лишь для того, чтобы исключить передачу собственного сигнала в тот момент, когда вблизи данного узла происходит распространение сигнала от одного из «соседей». Благодаря такой логике доступа большинства коллизий принимаемых пакетов данных на всех узлах сети удается избежать.

Кроме того, в составе программного каркаса EviNS предустанавливается и выполняется сетевой протокол «затопления» с управлением по порядковому номеру SNCF. Он предложен в [15] как усовершенствование базового протокола «затопления» [8] и основывается на принципе ретрансляции данных вида «возьми и передай дальше». Передача данных может быть инициирована любым узлом ГА-сети для отправки данных любому другому. В ходе передачи данных все промежуточные узлы, оказавшиеся в зоне «слышимости» передающего и способные принять эти данные, ретранслируют их дальше, до тех пор пока эти данные не достигнут адреса получателя. Чтобы исключить фатальное переполнение сети лавиной повторно принимаемых пакетов данных, ретранслируемые пакеты снабжаются номером и адресом передающего узла сети. При получении пакета принимающий узел сравнивает его номер с таблицей номеров уже принятых пакетов. Дальнейшей передаче подлежат только пакеты с новыми номерами.

Исследуемые параметры сети

В работе многих приложений, например при планировании миссии, предполагающей доставку команд управления, навигационных или текущих сенсорных данных, пользователь в первую очередь обращает внимание на время и вероятность доставки данных получателю. При постановке эксперимента и анализе его результатов учитывалась необходимость получения практических оценок именно этих показателей.

Вместе с тем для изучения вероятностей доставки разных видов данных от источника к получателю при постановке эксперимента, с одной стороны, требуется наличие возможности варьировать размер пакета данных (для разных размеров пакета вероятности их доставки могут отличаться). С другой стороны, для изучения задержек распространения данных в сетях различной организации необходимо осуществлять комбинирование протоколов управления доступом к среде и протоколов маршрутизации при неизменности размера передаваемого пакета. Для преодоления этого противоречия в эксперименте размер пакета варьировался. Чтобы исключить влияние размера пакета на задержку распространения данных в сети данной организации, продолжительность выдачи пакета в среду вычиталась из времени прохождения им каждого пролета сети. Благодаря этому появляется возможность оценивать задержки времени, обусловленные алгоритмом/протоколом распространения данных в сети, а не их размером. Преимущество такого подхода состоит также и в том, что в будущем он позволит сравнивать задержки в сетях, использующих разные комбинации протоколов управления доступом к среде и протоколов маршрутизации.

Представленный подход не отменяет также возможности оценки полного времени распространения в сети данных интересующего размера. Для того чтобы получить это время, к оценкам задержек, связанных с определенной комбинацией сетевых протоколов, необходимо лишь добавить требующуюся длительность выдачи данных пакета в среду (или размер пакета при известной скорости связи), умноженную на количество пролетов сети, пройденных данными от источника до получателя.

Описание эксперимента

Эксперименты проводились в мелководной акватории озера Тунайча, остров Сахалин. Использовались ГА-модемы серии S2C производства компании Evologics с предустановленным программным каркасом EviNS.

Данные полезной нагрузки передавались с помощью так называемых «срочных», то есть коротких (до 512 бит) сообщений [19], предназначенных для передачи небольших объемов данных: команд управления, навигационных строк, статусной информации участников обмена. Продолжительность выдачи пакета данных в среду варьировалась в интервале 200–300 мс.

ГА-сеть состояла из шести узлов. Каждый узел представлял собой multifunctional устройство, содержащее ГА-модем, аккумуляторную батарею емкостью 10 А/ч, поплавков из глубоководного синтактика и размыкатель.

В эксперименте один из узлов сети всегда выполнял функцию источника данных, генерирующего каждые 15 с пакеты для доставки через сеть поочередно четверем (из пяти) наиболее удаленным узлам сети в псевдослучайном порядке.

И узел – источник данных, и узел-получатель в каждом случае обмена регистрировали в памяти аппаратной платформы модема всю необходимую для дальнейшего анализа информацию о времени приема/передачи пакета данных, его

информационное содержание и подробные характеристики канала связи между всеми парами узлов сети (так называемыми «пролетами сети»), участвующими в распространении данных от источника к конечному получателю.

Узлы сети находились на расстояниях от 0,52 до 2,01 км друг от друга. В месте расположения сети глубины составляли 12–15 м. Место расположения сети и ее геометрия представлены на рис. 1.

Координаты каждого из узлов сети указаны в табл. 1.

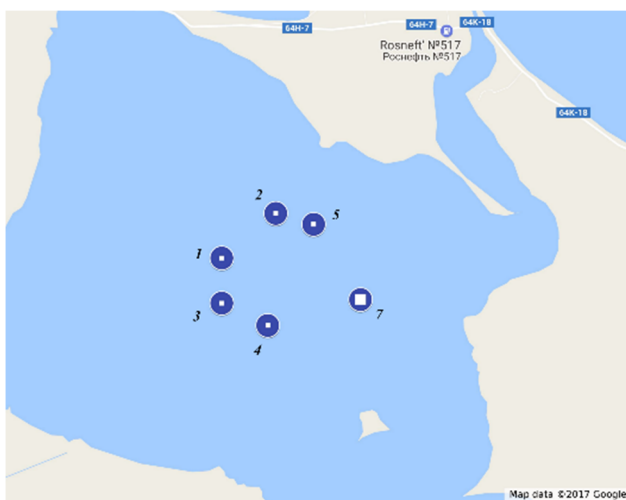


Рис. 1. Место расположения сети (узлы сети пронумерованы)

Т а б л и ц а 1

Номер узла	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м
1	46° 49' 40,0"	143° 07' 00,0"	13
2	46° 49' 59,9"	143° 07' 35,2"	10
3	46° 49' 20,0"	143° 07' 00,0"	10
4	46° 49' 10,0"	143° 07' 30,0"	10
5	46° 49' 55,0"	143° 08' 00,0"	10
7	46° 49' 21,5"	143° 08' 30,6"	12

Скорость звука составляла 1406,6 м/с до глубины 8,1 м, после чего линейно возрастала до 1413,9 м/с до глубины 13,9 м. При таком профиле распределения скорости звука акустическая энергия, излучаемая узлом 7 с глубины 12 м, концентрировалась в направлении меньших глубин, и узлы сети 2, 3, 4, 5, расположенные в толще воды выше узла 7, находились в зоне акустической освещенности. В свою очередь, узел 1, будучи заглубленным ниже узла 7, находился в зоне акустической тени.

Варьирование глубин позволяло добиваться различного качества принимаемого сигнала. Для исключения ситуаций, в которых любой узел сети мог бы переда-

вать данные любому другому узлу напрямую, уровень излучения ГА-модема устанавливался минимальным (168 дБ на расстоянии 1 м от излучателя при базовом уровне 1 мкПа). Кроме того, чувствительность приемного тракта каждого из модемов понижалась на 20 дБ по отношению к стандартной. Благодаря этим настройкам исключалась возможность передачи данных между узлами 7 и 1 напрямую (расстояние 2,01 км). Другие пары сети характеризовались сравнительно высокой вероятностью (0,5-0,9) доставки сообщения друг другу напрямую, однако никакие узлы сети не могли связываться с «соседом» с вероятностью, близкой к единице.

Функционирование в таких условиях приводило к изменению маршрутов передачи данных от источника к получателю в рамках этого протокола. Это обстоятельство позволило оценить основные характеристики ГА-сети при осуществлении цифровой связи между источником и получателем данных, находящимися в различных отношениях связности.

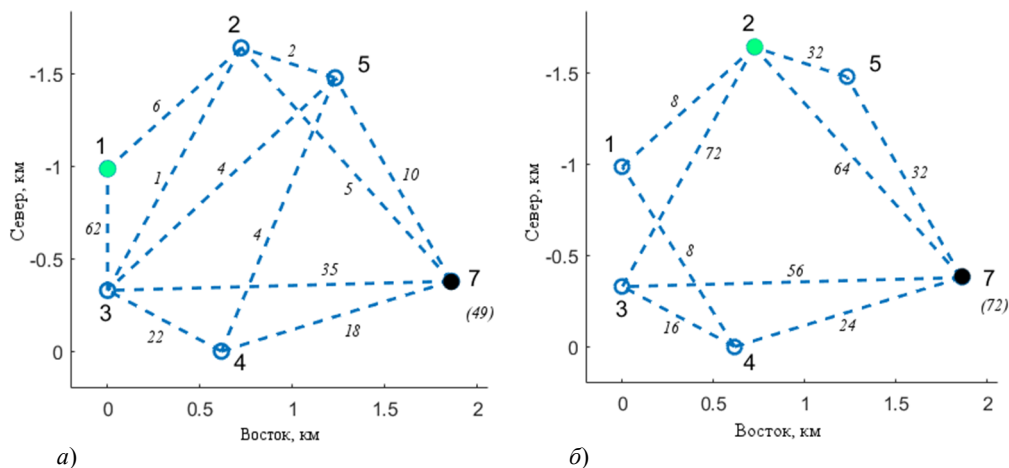
Под основными характеристиками сети в статье понимаются:

- 1) полное время распространения сообщения в сети;
- 2) среднее время распространения данных на одном пролете сети;
- 3) вероятность доставки данных получателю с первой попытки.

Наиболее важные результаты экспериментов представлены ниже на графиках и в пояснениях.

В общей сложности в узле 7 было сгенерировано 249 пакетов данных, которые были отправлены в сеть узлам 1, 2, 4, 5 (адресовались в случайном порядке). Узел 3, имеющий наилучшую связь с узлом 7, то есть наибольшую вероятность приема сообщения от него с первой же попытки, использовался только в качестве релейного узла (в качестве узла – получателя данных он особого интереса не представлял, так как получал бы данные почти всегда напрямую от источника; польза от остальных узлов сети состояла бы только в доставке дублирующих данных).

Число пакетов, адресованных в сети узлу 1, составляло 50, узлу 2 – 72, узлу 4 – 55, узлу 5 – 72. На рис. 2, а, б, в, г черным круглым маркером обозначен источник данных (всегда узел 7), светло-зеленым круглым маркером – получатель данных (1, 2, 4 или 5), синим кольцевым маркером – узлы сети, участвующие в обмене в качестве ретрансляторов.



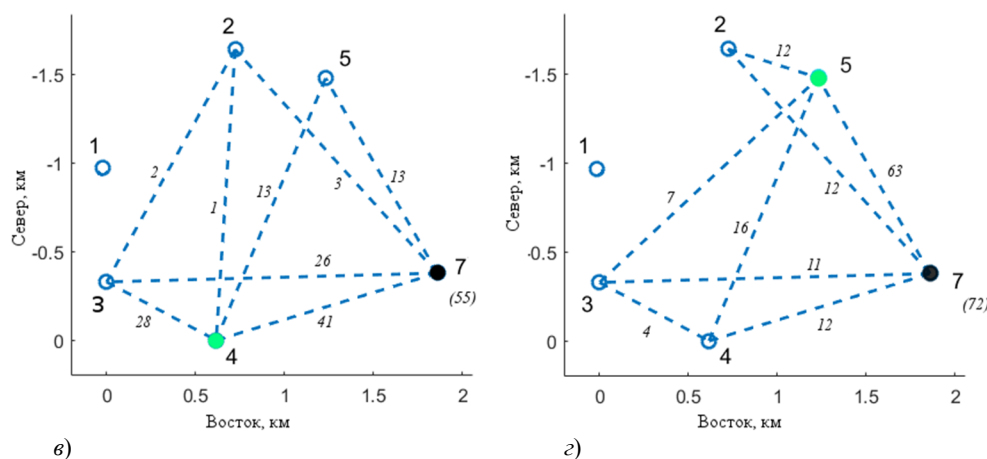


Рис. 2. Маршруты распространения между источником и получателем данных:
 а – получатель – узел 1, б – получатель – узел 2, в – получатель – узел 4, г – получатель – узел 5

На рис. 2, а показаны маршруты доставки пакетов данных между узлом 7 (источником данных) и узлом 1 (получателем пакета данных). Каждый пролет сети подписан числом ретранслированных по нему сообщений.

Поскольку прямая связь между источником и получателем (узлами 7 и 1) была исключена, все пакеты доставлялись через промежуточные узлы-ретрансляторы. Как видно из табл. 2, число пролетов составляло от 2 до 4. Наиболее короткий маршрут проходил через узлы 7–3–1 и 7–2–1. Наиболее длинный маршрут – через узлы 7–5–4–3–1.

Статистика по маршрутам распространения сигнала в сети для различных получателей данных представлена также в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Маршрут	Количество передач по маршруту от общего числа (%)	Маршрут	Количество передач по маршруту от общего числа (%)
Получатель – узел 1		Получатель – узел 2	
7–2–1	6,1	7–2	36,4
7–2–3–1	2,0	7–3–2	31,2
7–3–1	53,1	7–4–1–2	4,5
7–4–3–1	26,5	7–4–3–2	9,1
7–5–2–1	8,2	7–5–2	18,2
7–5–4–3–1	4,1		
Получатель – узел 4		Получатель – узел 5	
7–2–3–4	1,3	7–2–5	8,8
7–2–4	1,3	7–3–4–5	2,9
7–3–4	35,1	7–3–5	4,4
7–4	53,2	7–4–5	11,8
7–5–4	9,1	7–5	72,1

Специфика сетевого протокола, основанного на SNCF, состоит в том, что пакеты данных могут доходить до получателя по нескольким маршрутам. В связи с этим вместо 49 пакетов, отправленных в сеть, получателю было доставлено 68 (136%).

Поскольку с точки зрения передачи команд управления мобильным объектом, а также навигационных данных объекту управления наибольший интерес представляют самые быстрые пути доставки данных, дублирующие пакеты (пакеты с одинаковым номером и большим временем доставки) отбрасывались получателем. Поэтому на рис. 2, а для каждого из 49-ти пакетов учтен только самый короткий маршрут.

В южной части сети узлы характеризовались большей связностью, чем в северной: вероятность доставки пакета данных напрямую узлу 3 достигала 0,9, узлам 4 и 5 – около 0,65, а узлу 2 – около 0,55. Такая связность обуславливала доставку данных в основном по маршрутам, включающим узлы 3 и 4. Это не означало, однако, что остальные узлы сети в таких условиях были бесполезны. В более чем 14% случаев альтернативные маршруты доставки данных оказывались быстрее.

На рис. 3, а показаны минимальное, максимальное, среднее и медианное значения времени распространения пакета данных между источником (узел 7) и конечным получателем данных (узлы 1, 2, 4, 5). На рис. 3, б для каждого из узлов – получателей данных показаны минимальное, максимальное, среднее и медианное значения времени прохождения пакетом одного пролета сети.

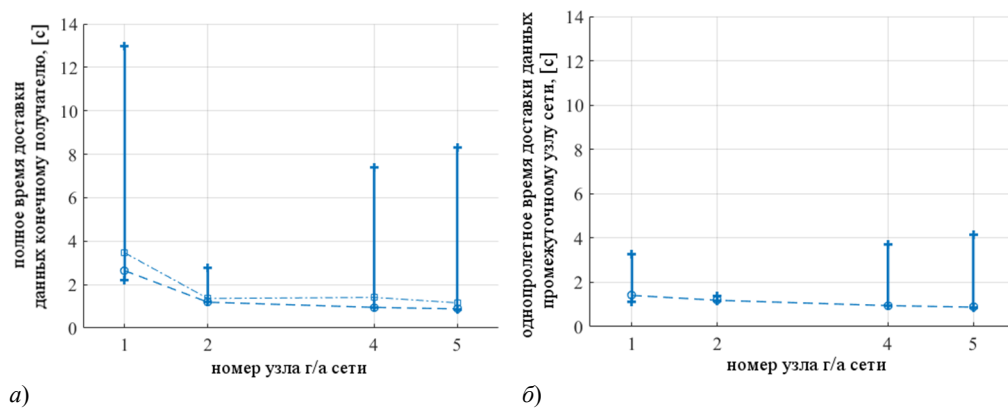


Рис. 3. Время распространения пакетов данных между узлом 7 и узлами-получателями 1, 2, 4, 5:
 а – время распространения запроса по всем пролетам сети от источника к получателю;
 б – время прохождения одного пролета сети (отрезки соединяют минимальные и максимальные значения времен, круговыми маркерами отмечены медианы, а квадратными – средние значения соответствующих времен)

В эксперименте полное время доставки пакета данных от источника 7 к получателю 1 составило от 2,20 до 12,99 с. Подобная разница объясняется спецификой реализации протокола CSMA-Aloha. После получения данных релейный узел в соответствии с протоколом управления доступом к среде выдерживал псевдослучайную паузу (равномерно распределенную на интервале от 0 до 3 с) и в случае незанятости канала перенаправлял пакет данных снова в гидроакустический канал широковещательным сообщением. В случае занятости канала релейный узел переводился в режим ожидания на время 2^n с, где n – целое положительное число – номер попытки прослушивания канала с повторно обнаруживаемой акустической активностью «соседей».

Важная на практике информация о продолжительности доставки пакета данных – медиана распределения – обозначена кольцевым маркером (вокруг медианы группируются наиболее часто встречаемые значения распределения).

В случае передачи данных узлу 1 медиана распределения составляла 2,64 с (при среднем 3,46 с). Видно, что значение медианы сильно смещено в сторону меньшей продолжительности доставки данных. Это объясняется тем, что распространение данных в сети по протоколу SNCF было возможно по нескольким маршрутам, один из которых был существенно короче других (данные, поступающие по длинным маршрутам, отбрасывались).

Аналогично рис. 2, б демонстрирует результаты экспериментов (маршруты доставки пакетов) при передаче данных между узлом 7, генерирующим данные, и узлом 2. В 36% случаев передача происходила напрямую. Все остальные данные сеть доставляла по альтернативным маршрутам, то есть при относительно слабой связи между источником и получателем основной вклад в доставку данных получателю также вносили ретрансляторы.

Благодаря доставке по множеству маршрутов адресуемый узел 2 вместо 72 отправленных источником пакетов получил 176 (244%). Наиболее коротким был прямой маршрут, то есть 7–2. Самые длинные маршруты проходили через узлы 7–4–1–2 и 7–4–3–2. Интервал распределения полного времени доставки пакетов от источника 7 к получателю 2 показан на рис. 3, а (напротив индекса 2 по оси абсцисс). Поскольку в целом маршруты доставки были более короткими, чем между узлами 7 и 1, продолжительность доставки данных была меньше и составляла от 1,18 до 2,79 с, а медиана распределения – 1,19 с (среднее 1,36 с). Как и в предыдущем случае, распространение данных в сети по протоколу SNCF могло осуществляться по большому количеству маршрутов. Один из них был короче других (данные, поступившие по длинным маршрутам, отбрасывались). В связи с этим значение медианы было также смещено в сторону меньшей продолжительности доставки данных.

Рис. 2, в и г демонстрирует маршруты доставки пакетов между узлом 7, генерирующим данные, и узлами 4 и 5. В 53% и 69% случаев соответственно передача происходила напрямую. Остальные данные сеть доставляла по альтернативным маршрутам. При обмене с узлами 4 и 5 самыми короткими были прямые маршруты, то есть 7–4 и 7–5 соответственно, а наиболее длинными – 7–2–3–4 и 7–3–4–5 соответственно. Благодаря доставке по множеству маршрутов узел 4 вместо 55 отправленных пакетов получил 83 (151%), а узел 5 вместо 72 – 98 (136%). Интервалы распределения полного времени доставки пакетов от источника 7 к получателям 4 и 5 показаны на рис. 3, а (напротив индексов 4 и 5 по оси абсцисс). Они имеют сравнительно широкие границы (0,94–7,40 с и 0,87–8,32 с соответственно), однако большие продолжительности доставки аналогично встречались сравнительно редко, и, поскольку маршруты доставки были еще более короткими, чем между узлами 7 и 2, медиана распределения продолжительности доставки пакетов узлам 4 и 5 была еще меньше – 0,95 и 0,88 с соответственно.

Вероятность доставки данных

За счет допускаемого по протоколу сетевого уровня дублирования маршрутов доставки данных на каждый отправленный пакет данных узел получал более одного пакета, в частности до 136–252 % от числа отправленных. В связи с этим, если не ограничивать задержку времени доставки, в течение которой пакет данных считается действительным (с истекшим сроком давности), вероятность доставки данных от источника до любого получателя в сети равнялась бы единице.

Вместе с тем, если ограничить срок истечения давности данных, например, пятью секундами, вероятность своевременной доставки данных составляла 0,91, 1,0, 0,95, 0,96 для случая доставки данных узлам 1, 2, 4 и 5 соответственно.

Более подробные сведения в отношении вероятности доставки данных за определенные интервалы времени представлены на рис. 4. Здесь сплошной линией обозначена вероятность доставки данных в сети от источника (узел 7) до конечного получателя – узла 1 (возможность доставки данных напрямую к нему всегда отсутствовала). Как следует из рисунка, при ограничении допустимого времени доставки пакета, например, тремя секундами вероятность его своевременной доставки через сеть составляла 0,56. При ограничении допустимого времени доставки пакета пятью секундами вероятность его своевременной доставки через сеть возрастала до 0,91. Аналогичным образом вероятности доставки данных за время, интересующее пользователя, можно найти на рис. 4 для конечного узла-получателя 4 (штрих-пунктирная линия) и узла-получателя 5 (пунктирная линия).

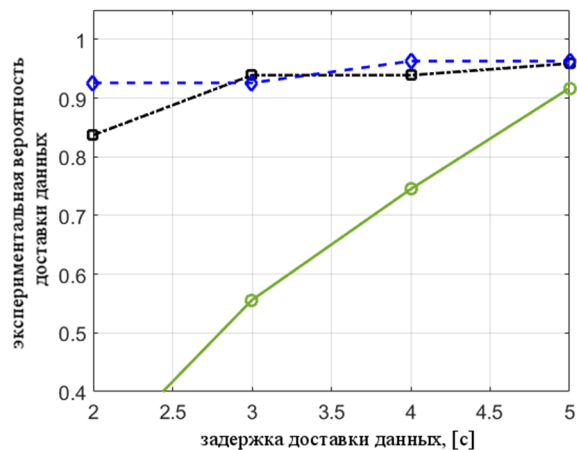


Рис. 4. Зависимость вероятности доставки данных узлам 1,4 и 5 от заданной допустимой задержки

Однопролетная задержка распространения данных

На рис. 3, б продемонстрированы интервалы распределения средней продолжительности прохождения пакетом данных одного пролета между узлами сети в направлении каждого из принимающих узлов (индексы 1, 2, 4, 5 соответственно). Несмотря на то что пролеты сети отличаются по длине (0,5–2 км), было рассчитано среднее время прохождения одного пролета при движении сигнала по различным маршрутам путем деления полного времени распространения пакетов данных по соответствующему маршруту на число пролетов. Таким образом можно получить приближительную оценку времени прохождения пакетов данными одного пролета сети. Информация об однопролетной задержке распространения данных может быть полезной для последующего сравнения экспериментальных результатов работы с результатами, полученными для сетей другой структуры, покрывающих примерно такую же площадь акватории, то есть примерно 4 кв. км.

При доставке данных узлу 1 продолжительность прохождения пакетом одного пролета сети была оценена в пределах 1,10–3,25 с. Учитывались задержка распространения акустического сигнала в канале, псевдослучайная (из интервала 0...3 с) задержка переизлучения сигнала промежуточным узлом сети, а также экспоненциально нарастающая задержка переизлучения сигнала (2^n с, где n определено выше). Медиана распределения составляла 1,37 с.

В случаях доставки данных узлу 2 продолжительность прохождения пакетом одного пролета сети составляла 1,18–1,40 с (с медианой 1,19 с), а при доставке данных узлам 4 и 5 продолжительность прохождения была близка к продолжительности прохождения для узла 1 (однако с медианами, еще более близкими к нижней границе соответствующего интервала наблюдаемых значений, – 0,95 и 0,88 соответственно).

Более близкое расположение медианы к нижней границе объясняется тем, что в случае доставки пакета данных одновременно по многим коротким маршрутам (2 пролета) на одном из них (ретрансляторе) псевдослучайная задержка переизлучения пакета с высокой вероятностью была ближе к нижней границе интервала задержек.

Кроме того, как видно из сравнения значений однопролетной продолжительности доставки данных в разных экспериментах, с удлинением маршрута за счет числа пролетов сети и уменьшением числа альтернативных маршрутов однопролетная задержка распространения данных возрастает. При равномерном распределении всех случайных величин на заданном интервале, с возрастанием числа пролетов до бесконечности и уменьшением числа альтернативных маршрутов до одного распределение вероятностей суммы случайных величин будет стремиться к логарифмическому распределению с математическим ожиданием в центре заданного равномерного распределения случайной величины. Медиана однопролетной задержки распространения данных будет близка к математическому ожиданию этого логарифмического распределения.

Как следует из рис. 3, б и табл. 2, с удлинением маршрута за счет числа пролетов сети и уменьшением числа альтернативных маршрутов однопролетная продолжительность доставки данных действительно возрастает от 0,88 с в случае связи с узлом 5 (в котором наблюдалось наибольшее число коротких маршрутов) до 1,37 с в случае связи с узлом 1 (в котором наблюдалось наибольшее число длинных маршрутов).

Заключение

ГА-модемы, содержащие в своем составе программный каркас EviNS как часть своего стандартного ПО, предоставляют возможность использования встроенных сетевых протоколов всех уровней для практических задач пользователя, а также модификации или замены встроенных протоколов на специализированные пользовательские. Использование программного каркаса EviNS освобождает пользователя от необходимости добавления в состав сетевого узла дополнительного (внешнего) аппаратного обеспечения, поддерживающего функционирование сети, и, таким образом, упрощает и удешевляет процесс создания и поддержания работоспособности ГА-сети.

Эксперименты подтверждают возможность успешного выполнения дальнего (за пределами прямой акустической «видимости») обмена данными между подводными абонентами цифровой связи (обсерваториями, аппаратами), каждый из которых способен выступать в роли сетевого узла (ретранслятора). В случае когда прямая связь между источником и получателем отсутствовала, доставка данных обеспечивалась через соседние узлы.

В проведенных экспериментах практически наблюдаемые однопролетные задержки доставки сообщений чаще всего составляли 0,88–1,37 с. Задержки передачи сообщений по полному маршруту (от источника до получателя данных), как правило, составляли 0,88–2,64 с. Наиболее часто наблюдаемые (по медиане) задержки распространения данных в сети соответствовали сумме задержек распространения на маршруте (функция дальности) и сумме задержек, получаемых из статистических характеристик интервалов псевдослучайной задержки (переизлучения сигнала ретранслятором) на каждом пролете сети.

Полученные величины задержек доставки сообщений до конечного узла-получателя (по крайней мере, в сети подобной конфигурации и размера) обу-

словливают возможность планирования алгоритмов оперативной координации мобильных узлов ГА-сети (подводных аппаратов) в случае их группового использования в обширной акватории.

Поскольку ГА-модемы были настроены для передачи сигналов с наименьшей мощностью и приема с наименьшей чувствительностью, можно ожидать, что в реальной обстановке, например в открытом море с относительно большими глубинами, после параметризации ГА-модемов до номинальной приемной чувствительности и номинальной мощности излучения сигнала (190 дБ на расстоянии 1 м от излучателя при базовом уровне 1 мкПа) следует ожидать значительного расширения покрытия сети до порядка десятков/сотен квадратных километров.

ГА-сеть продемонстрировала возможность передачи данных от источника к получателю по множеству маршрутов. В большинстве случаев данные доставлялись не по одному маршруту, а одновременно по нескольким. Обусловленная протоколом сетевого уровня SNCF возможность ретрансляции пакетов промежуточными узлами сети другим узлам, способным принимать эти пакеты, приводила к частому дублированию доставляемых данных.

С одной стороны, это свойство протокола SNCF является преимуществом, поскольку оно обеспечивает высокую вероятность и наименьшее время доставки данных конечному получателю (часто по маршруту с наименьшим числом пролетов). С другой стороны, повторная доставка данных связана с повышенными расходами энергии узлов сети. В связи с этим использование в чистом виде протокола SNCF может быть рекомендовано для пользовательских приложений, в которых экономия расходов энергии на акустическую связь между узлами сети не является критически важным требованием.

В частности, использование протокола SNCF может быть рекомендовано для сетевой передачи данных между подводными аппаратами или подводным аппаратом и плавсредством на поверхности, то есть в приложениях, в которых потребление энергии на акустическую связь намного меньше, чем у других устройств/механизмов подводного аппарата или судна. Тем не менее протокол SNCF едва ли стоит рекомендовать для использования в автономных сенсорных сетях, где запасы энергии обычно малы, но необходима продолжительная работа. Комбинации протоколов, позволяющие минимизировать потребление энергии на доставку данных (за счет снижения избыточности и, соответственно, вероятности доставки с первой попытки), являются предметом рассмотрения отдельной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., and Zhang, L.**, MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's, *ACM SIGCOMM* 1994, London, UK, August 31 – September 2 1994, pp. 212–225.
2. **van Dam, T. and Langendoen, K.**, An adaptive energy efficient mac protocol for wireless sensor networks, *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM Press, 2003, pp. 171–180.
3. **Woo, A., Tong, T., and Culler, D.**, Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks, *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM Press, 2003, pp. 14–27.
4. **Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D.**, An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2002.
5. **Chitre, M., Shahabudeen, S., Stojanovic, M.**, Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges, *Marine Technology Society Journal*, Spring 2008, vol. 42, no.1, pp. 103–116.

6. Jiejun, K., Jun-hong, C., Dapeng, W., and Gerla, M., Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications. *IEEE Military Communications Conference*, 2005.
7. Heidemann, J., Wei, Y., Wills, J., Syed, A., and Yuan, L., Research challenges and applications for underwater sensor networking. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2006.
8. Otnes, R., Asterjadhi, A., Casari, P., Goetz, M., Husøy, T., Nissen, I., Rimstad, K., van Walree, P., Zorzi, M., Underwater Acoustic Networking Techniques, *Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering*, 2012. DOI 10.1007/978-3-642-25224-2_1.
9. Kebkal, O., Kebkal, V., Kebkal, K., EviNS: Framework for development of underwater acoustic sensor networks and positioning systems, *OCEANS, IEEE – Italy*, 2015, pp. 1–6.
10. Guerra, F., Casari, P., Zorzi, M., World ocean simulation system (woss): A simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling, *Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on UnderWater Networks*, ser, WUWNet '09, New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 4:1–4:8. Размещение: <http://doi.acm.org/10.1145/1654130.1654134>.
11. Roberts, L.G., ALOHA Packet System With and Without Slots and Capture, *Computer Communications Review*, April 1975, 5, no. 2, pp. 28–42.
12. Syed, A.A., Ye, W., Heidemann, J., Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, vol. 26, No. 9, pp. 1731–1743. Размещение: <http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Syed08b.pdf>.
13. Peleato, B., Stojanovic, M., Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Sensor Networks, *IEEE Communication Letters*, 2007, pp.1025–1027.
14. Guerra, F., Casari, P., Zorzi, M., MAC Protocols for Monitoring and Event Detection in Underwater Networks Employing a FH-BFSK Physical Layer, *Acoustic Sensor Networks, IEEE Comm. Letters*, 2007, 11 (12), pp. 1025–1027. Размещение: <https://telecom.dei.unipd.it/media/download/313/>.
15. Rahman, A., Olesinski, W., and Gburzynski, P., Controlled flooding in wireless ad-hoc networks, *Wireless Ad-Hoc Networks*, 2004 International Workshop on, IEEE, 2004, pp. 73–78.
16. Cavin, D., Schiper, A., Probabilistic Broadcast for Flooding in Wireless Mobile Ad hoc Networks, *Proc. Conf. Wireless Communications and Networking, WCNC 2003, IEEE*, 2003, vol. 2.
17. Liang, W., Yu, H., Liu, L., Li, B., Che, C., Information-carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network, *International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*, pp. 729–734.
18. Wahid, A., Dongkyun, K., Analyzing Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks, *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, December 2010, vol. 2, no. 3, pp. 253–261.
19. Kebkal, O., Komar, M., Kebkal, K., D-MAC: Hybrid media access control for underwater acoustic sensor networks, *Proceedings of IEEE Communications Workshops (ICC)*, IEEE International Conference, Cape Town, South Africa, 2010. ISBN: 978-1-4244-6824-9.

Kebkal, K.G., Kebkal, V.K., Kebkal, A.G. (EvoLogics GmbH, Berlin, Germany), **Minaev, D.D., Leonenkov, R.V., Korytko, A.S.** (Special Design Bureau for Marine Research Automation, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
 Experimental Estimation of Performance of Underwater Digital Network Based on Acoustic Modems with EviNS Software Framework, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 3 (103), pp. 121–135.

Abstract. The paper presents a new engineering solution which considerably reduces costs for the development and operation of sonar sensor networks (SSN), while retaining small size and high level of energy saving for each of the network nodes (modems functioning as e.g. communication network devices, long-baseline bottom antenna units, etc.). The SSN performance parameters are shown for the mode being of interest, in particular, for positioning and navigation of autonomous unmanned underwater vehicles; delays in forwarding small datasets from the SSN, as well as probabilities of small datasets delivery from source for finite user are studied (e.g. control commands, sensor data, data on positions of long baseline units, and timing sequences).
 The solution is based on the design and introduction of special-purpose software framework EviNS (EvoLogics Intelligent Networking Software Framework) into the soft- and hardware platform of underwater acoustic modem (UAM).

Results of experimental studies of digital SSN performance are demonstrated, where the SSN employs part of EviNS framework protocols, namely the combination of un-coordinated medium access protocol and routing protocol based on the network «flooding» algorithm with sequence number control (control of numbers of data packets and network forwarding nodes).

The experimentally obtained values of probabilities and delays of data delivery from source to finite recipient provide the network user with the information necessary for planning the tasks of group interaction and online coordination of the SSN nodes, such as mobile nodes on underwater vehicles (at least in the SSN having the configuration and size similar to those described in the paper).

Key words: underwater digital network, acoustic modem, EviNS, probability of delivery.

Материал поступил 28.05.2018