УДК 681.88, 681.883.484:485,
550.34.037.2

ЦИФРОВЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СЕТИ С ДОПУСТИМЫМИ ДЛИТЕЛЬНЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ И РАЗРЫВАМИ СОЕДИНЕНИЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

К.Г. Кебкал [1], А.Г. Кебкал [1], В.К. Кебкал [1,2], А.К. Кебкал [2]

[1]Evologics GmbH, Акерштрассе 76,
Берлин, 13355 Германия
[2]АО "Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации",
г. Санкт-Петербург

Разработанная технология обеспечивает передачу данных в сетях произвольных топологий, в которых узлы пространственно разнесены настолько, что передача данных от источника к получателю не может быть выполнена напрямую. Реализация основана на программном конструктиве DTN2 с открытым исходным кодом. Для адаптации проекта DTN2 к работе на аппаратной платформе гидроакустического модема Evologics технологии S2C был разработан и внедрен новый, специализированный слой протоколов, получивший название DMAC CL. Экспериментальные результаты получены в ходе океанических испытаний REP14, организованных Центром морских исследований и экспериментов (CMRE) в июле 2014 г.

I. Введение. Технология цифровой гидроакустической сети, в которой при передаче данных допускаются большие задержки, перебои или разрывы соединения между узлами, способна обеспечить передачу данных от источника к получателю в чрезвычайно сложных условиях распространения сигнала, характерных, в частности, для гидроакустической среды [1–3]. В цифровой гидроакустической связи можно часто наблюдать разрывы соединения между гидроакустическими модемами, эти разрывы могут существовать неопределенно большое время. Сеть, способную функционировать в таких условиях, принято обозначать DTN.

Для обеспечения сетевой связи в таких условиях, технология DTN основывается на специализированном протоколе Bundle [4] (от английского "связка" или "пачка"), называемого также протоколом диспетчера пачек данных. Этот протокол реализует механизм, кратко обозначаемый как "сохранить и переправить". Он предполагает промежуточное сохранение передаваемых данных и их отправку дальше по сети в направлении конечного получателя сразу, как возникнет возможность, например, после открытия или повторного возникновения соединения со следующим (по маршруту следования) узлом [5]. Таким образом, благодаря механизму "сохранить и переправить", в сети появляется возможность сохранной передачи больших файлов в условиях сложного гидроакустического канала на большие расстояния от источника к получателю.

Сетевой обмен данными большого размера основан на пакетном протоколе передачи данных в последовательности соединений "точка-точка" (в парах соседних узлов). Пакетный протокол предполагает детектирование и автоматическую досылку поврежденных данных внутри каждой пары узлов. Большой файл может разбиваться на последовательность фрагментов. Каждый фрагмент может сохраняться на промежуточном узле сети и удаляться только после того, как соседний узел подтвердит его полный и безошибочный прием. Конечный получатель данных принимает файл целиком от протокола диспетчера, ответственного за сборку файла из принятых фрагментов.

Примером задачи, в которой следует использовать сеть типа DTN, является передача данных между донными модулями, между которыми могут возникать разрывы соединений (из-за изменения гидрологии, неисправностей на релейных узлах, и т.д.). Для восстановления соединения могут использоваться подводные аппараты, способные входить в зону покрытия узла-отправителя и узла-получателя (или поочередно, курсируя между ними) и, таким образом, обеспечивать/восстанавливать соединение.

Статья организована следующим образом. Раздел II содержит описание технологии передачи данных по сети типа DTN, основанной на проекте DTN2 с открытым исходным кодом, исполняемого на аппаратной платформе гидроакустического модема технологии S2C. Раздел III содержит описание разработанного и внедренного в исходный код

DTN2 конвергентного слоя DMAC CL. В разделе IV описан стек протоколов, которыми был дополнен DTN2 для сетевой передачи данных в различных топологиях и условиях функционирования сети. В разделе V представлены результаты океанических экспериментов морской экспедиции REP14.

II. Проект DTN2 с открытым исходным кодом. Проект DTN2 представляет собой исследовательский программный конструктив, предназначенный для реализации различных вариантов сети типа DTN, разработанный группой DTN Research Group [6].

DTN2 содержит стандартизированный многоуровневый стек протоколов (рис. 1) и поддерживает включение дополнительных уровней в промежуток между уровнем приложения и транспортным уровнем.

Р и с. 1. Стек протоколов DTN2

При поступлении пользовательских данных для передачи по сети DTN2 размещает эти данные в "пачки" и осуществляет вызов транспортного уровня для направления этих пачек следующему узлу сети. В случае, если узлы оказались в состоянии установить соединение, уровень управления доступом к среде помечает текущее соединение как "открытое" и отдает пачку данных физическому уровню.

Транспортный уровень сети типа DTN предназначен для доставки "пачек" от источника к получателю через все промежуточные узлы.

DTN2 включает большой набор свойств, который оказался пригодным и был приспособлен для создания цифровых гидроакустических сетей на основе гидроакустических модемов технологии S2C производства компании Evologics (рис. 2). В частности, это:

– уровень приложения, который использует протокол диспетчера для приема и передачи пользовательских данных, а так же выступает в качестве мультиплексора между сервисами сети типа DTN и сервисами, не относящимися к сети типа DTN, но исполняемых на одном и том же узле сети;

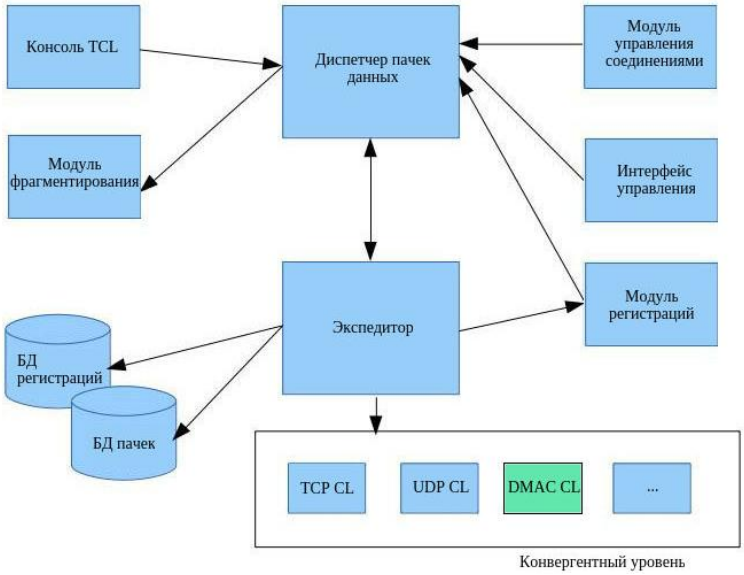
– сервис маршрутизатора, который позволяет формировать маршруты передачи данных с помощью адресных и широковещательных сообщений, создание очередности отправки, репликацию пачек, принятие решения о сохранении или удалении пачек;

– сервис сохранения данных, обеспечивающий промежуточное и долговременное хранение пачек, предоставляющий метаданные о пачках, информацию о состоянии сети (например, таблицу маршрутизации);

– сервис экспедитора, который отвечает за фрагментацию данных на пачки и

их сборку/восстановление, направление пачек следующему на маршруте узлу сети через специализированный конвергентный уровень, реализацию механизма учета пачек посредством управления их заголовками;

– конвергентный уровень, который несет ответственность за отправку и получение пачек данных, за актуализацию информации о доступных соединения в сети, а также за поиск доступных соединений (если это предусмотрено дополнительными протоколами), за формирование и предоставление информации о существующих соединениях путем генерирования сообщений сервису экспедитора.



Р и с. 2. Архитектура DTN2 (взаимодействие протокола диспетчера с сервисом экспедитора и конвергентным уровнем)

III. Специализированный конвергентный уровень DMAC CL. Архитектура сети типа DTN предусматривает наличие протоколов конвергентного уровня [7] для исполнения протокола диспетчера пачек данных поверх протокола транспортного уровня.

Протоколы конвергентного уровня обеспечивают прием и передачу пачек, и отвечают на запросы об установлении и закрытии соединений с другими узлами сети.

В исходном исполнении в состав программного конструктива DTN2 входит встроенный в конвергентный уровень протокол подобный TCP (в частности, TCP CL) и дейтаграммный протокол UDP. Однако эти протоколы не обеспечивают возможности функционирования сети типа DTN с использованием гидроакустических модемов.

Для создания возможности исполнения DTN2 на аппаратной платформе гидроакустического модема (в частности, модемов компании Evologics) был разработан и внедрен в конвергентном уровне программного конструктива DTN2 новый, специализированный слой протоколов, получивший название DMAC CL.

Создание DMAC CL обеспечило обмен сообщениями с протоколом D-MAC [8], представляющем собой стек протоколов уровня управления доступом к среде, являющихся нативными для гидроакустических модемов технологии S2C. Также, специализированный слой протоколов DMAC CL обеспечил обмен сообщениями с сервисом экспедитора для фрагментации и сборки/восстановления данных, направление пачек следующему на маршруте узлу сети, модификации заголовков пачек.

Для того чтобы DTN2 мог функционировать на аппаратной платформе гидроакустического модема технологии S2C при разработке DMAC CL учитывалась необходимость поддержки основных режимов передачи данных, используемых протоколами уровня управления

доступом к среде этих модемов, в частности, режима "пакетных данных" и режима "срочных сообщений".

Режим "пакетных данных". Важной особенностью режима пакетных данных является оптимизация модемом скорости передачи данных для текущих условий среды распространения сигнала, в частности – возможность настройки максимальной скорости передачи данных для допустимой статистической вероятности битовых ошибок (т.е. вероятности, при которой встроенный алгоритмом коррекции ошибок с заданной избыточностью кода способен исправлять все битовые ошибки). В режиме пакетных данных также динамически (в зависимости от изменяющихся условий передачи) настраиваются длительности блоков данных, составляющих передаваемый пакет, а также число блоков в пакете.

Благодаря этим свойствам D-MAC, слой протоколов DMAC CL унаследовал встроенные возможности модемов S2C технологии для передачи больших сообщений/файлов.

Следует отметить также встроенное в DMAC CL свойство противодействия коллизиям, которые могут возникать в ходе обмена данными между узлами сети; для этого в DMAC CL предусмотрена возможность обнаружения активности соседних узлов и перехода в состояние “отсрочки передачи” (back-off), генерируя при этом сообщение для сохранения пачки данных с целью ее отложенной передачи.

Режим "срочных сообщений". Особенность этого режима состоит в отсутствии необходимости обязательного установления соединения для передачи пользовательских данных между узлами сети. Он используется для передачи коротких сообщений (до 64 байт), при этом сообщение (пачка) может не подвергаться фрагментации сервисом экспедитора.

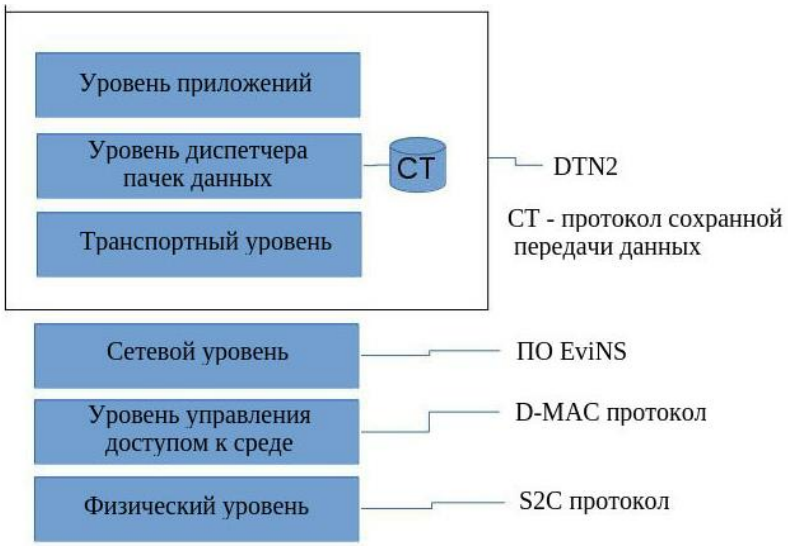
Поскольку сообщения такого типа могут требовать немедленной доставки (если это, например, команды), конвергентный уровень также был оснащен возможностью повышения приоритета сообщения. Для этого сервис экспедитора уведомляется о размещении такого сообщения в начало очереди для отправки по первой возможности.

Модемный протокол управления доступом к среде D-MAC оснащен механизмом нотификации, например, с помощью оповещения сервиса экспедитора квитанциями о результатах обмена данными между узлами сети (delivered или failed), упрощая и ускоряя, таким образом, работу сервиса экспедитора по сохранной доставке данных. Например, в случае успешной доставки текущей пачки данных, она немедленно удаляется их хранилища; но если попытка доставки оказалась не успешной, то пачка остается в хранилище для более поздней отправки.

IV. Взаимодействие DTN2 и стека протоколов сетевого уровня EviNS. Поскольку сервис экспедитора способен направлять пачки для передачи "следующему" узлу, в архитектуре сети типа DTN должен существовать уровень, способный принимать решения о том, какой именно узел является следующим на пути передачи пачек данных конечному получателю. В гидроакустических модемах технологии S2C им уровнем является сетевой уровень, оснащенный модулем маршрутизации данных. Маршрутизатор создает и актуализирует таблицу возможных маршрутов доставки данных от источника к получателю.

По сути, слой протоколов DMAC CL, внедренный в DTN2, по своим функциональным возможностям соответствует транспортному уровню. В частности, он оснащен, как возможностью взаимодействия с встроенным в DTN2 маршрутизатором, так и с внешним (по отношению DTN2) сетевым уровнем, что предоставляет широкие возможности для применения в гидроакустических сетях модемов технологии S2C.

Имплементация внешнего стека протоколов сетевого уровня основывалась на имеющихся в архитектуре DTN2 уровнях: приложения, экспедитора, транспортного (рис. 3) и, отчасти, сетевого уровня. Протокол сетевого уровня, исполняющий в DTN2 стандартные функции маршрутизатора, был использован только для формирования запросов на получение от внешнего стека протоколов сетевого уровня информации о маршрутах передачи данных и актуализации таблиц маршрутизации.



Р и с. 3. Стек протоколов DTN2 – надстройка над стеком протоколов гидроакустического модема технологии S2C

Функцию внешнего стека протоколов сетевого уровня исполнял разработанный в компании Evologics программное обеспечение EviNS (Evologics intelligent Networking Software Framework [9]), нативное по отношению к гидроакустическим модемам технологии S2C и поставляемое пользователю как программный продукт с открытым программным кодом.

Работа с EviNS предполагает "низкий порог вхождения" пользователя и, соответственно, быструю наработку прикладных задач на его основе. Также, концепция EviNS с открытым исходным кодом позволяет малозатратное расширение и наращивание стека протоколов сетевого уровня силами пользователя.

На данный момент в состав стека сетевых протоколов EviNS входят:

– протокол статической маршрутизации;

– протокол "вытеснения и заполнения": заполнения с управлением по порядковому номеру (SNCF – Sequence Number Controlled Flooding [10]);

– протокол с динамическим "вытеснением и заполнением" (DPFlood – Dynamic Probabilistic Flooding [11]);

– протокол маршрутизации, основанный на обмене совмещенных пакетов со служебной информацией и данными полезной нагрузки (ICRP – Information Carrying Based Routing Protocol) [12];

– внутренний протокол поиска пути (EvoPF – Evologics Path Finding Protocol);

– динамический протокол поиска пути (DPF – Dynamic Path Finding Protocol).

Следует отметить, что использование протоколов, основанных на "вытеснении и заполнении", предполагает передачу узлами сети широковещательных сообщений. Это может приводить к множественным коллизиям приема-передачи пачек данных. Для снижения числа коллизий дополнительно к D-MAC (нативному для модема) был разработан и внедрен в составе EviNS дополнительный стек протоколов уровня управления доступом к среде, в частности, CSMA-Aloha [13], DACAP [14] и T-Lohi [15]. По отношению к гидроакустическим модемам дополнительный стек протоколов является внешней надстройкой, но с точки зрения доступа к нему он имеет такой же интерфейс как модемный протокол D-MAC.

В статье представлено экспериментальное использование DTN2 с подключенным к нему внешним стеком протоколов сетевого уровня программного обеспечения EviNS.

V. Экспериментальные результаты. В этом разделе представлены экспериментальные результаты, полученные в ходе океанических испытаний REP14, организованных Центром морских исследований и экспериментов (CMRE – Centre for Maritime Research and Experimentation) 22–29 июля 2014 г. На рис. 4 отмечено место проведения экспериментов.

Р и с. 4. Место проведения экспериментов REP14 в Атлантическом океане

Для организации передачи данных в качестве узлов гидроакустической сети использовались следующие плавсредства, оснащенные гидроакустическими модемами S2C 18/34 [16]:

– два волновых глайдера (Liquid Robotics);

– два автономных необитаемых подводных аппарата (OceanScan);

– исследовательское судно НИС “Alliance”(с четырьмя узлами сети);

– заякоренный буй – шлюз (CMRE).

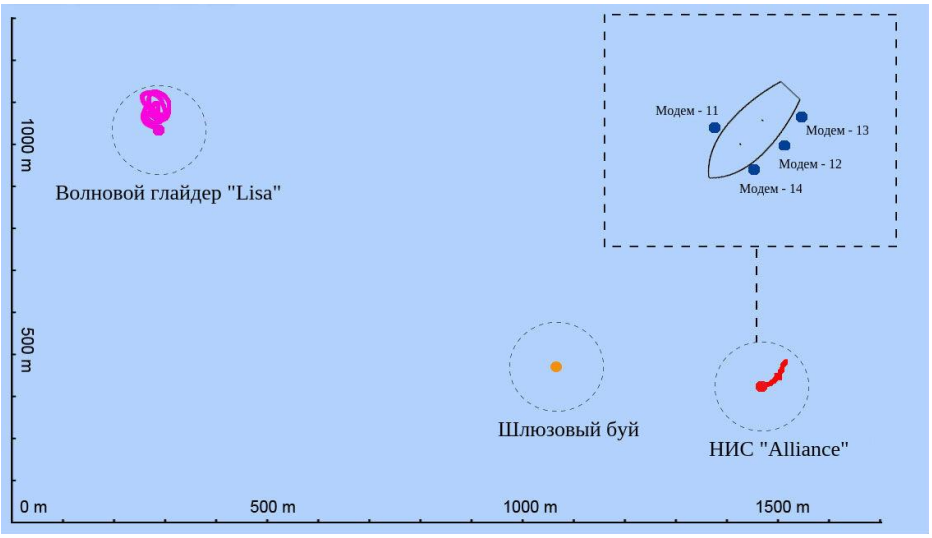
Развернутые плавсредства позволяли организовывать цифровые гидроакустические сети со статическими и мобильными узлами. В первой группе экспериментов исследовалась производительность сети типа DTN со статическими узлами сети. Во второй – с мобильными узлами и динамической маршрутизацией.

А. Сеть типа DTN для статических узлов сети – статическая маршрутизация. Статическая сеть состояла из шести узлов:

– волновой глайдер “Lisa”, который служил источником данных;

– заякоренный шлюзовый буй, который служил одним из промежуточных узлов;

– НИС “Alliance” с тремя узлами (Модем-12, Модем-13, Модем-14), служившими промежуточными узлами, и одним узлом (Модем-11), служившим конечным получателем данных. Топология сети представлена на рис. 5.



Р и с. 5. Топология статической сети

Глубина размещения узлов Модем-11 и Модем-14 составляла 3 м. Глубина размещения узлов Модем-12 и Модем-13 составляла 7 м. Благодаря такому распределению по глубинам обеспечивались условия, в которых не все свешенные с борта судна узлы могли "слышать" все остальные.

Дальность доставки данных от источника к получателю составляла 1050 м. Статический маршрут передачи данных задавался в виде последовательности узлов, через которые должны были пройти данные источника:

Глайдер "Lisa" –> Шлюзовый буй –> Модем-12 –> Модем-14 –> Модем-13 –> Модем-11.

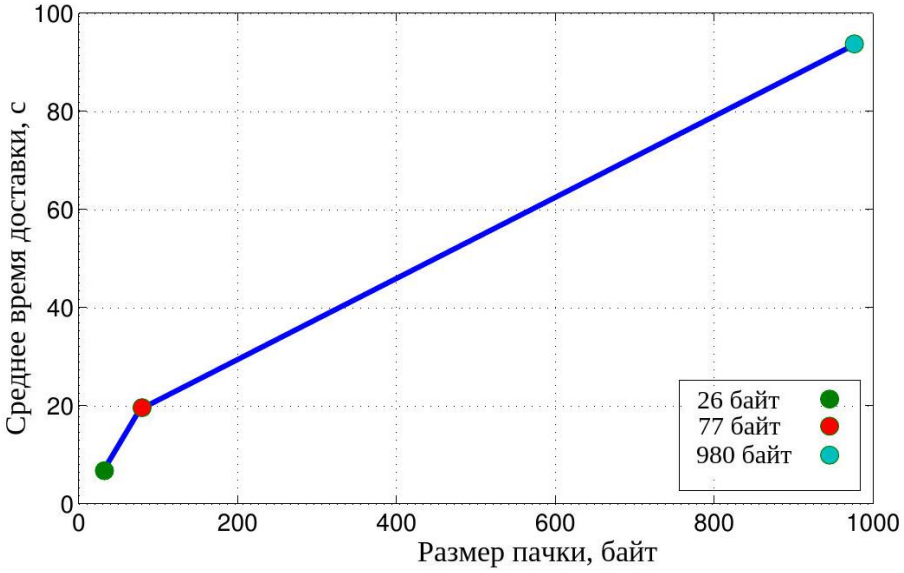
Источник генерировал данные трех размеров: малые – 26 и 77 байт (имитируя команды управления) и сравнительно большие – 980 байтов (имитируя данные сенсоров).

Данные с размером менее 64 байт передавались в виде срочных сообщений с подтверждением.

Данные с размером более 64 байт передавались в виде пакетных сообщений с автоматической досылкой поврежденных данных (как указано выше этот тип данных поддерживается нативным для технологии S2C стеком протоколов D-MAC). Перед отправкой данных протоколы DTN2 фрагментировали передаваемые данные в две неравные по размеру пачки, 966 и 24 байт соответственно.

Производительность сети оценивалась по ряду параметров, описанных ниже.

На рис. 6 представлен анализ производительности сети по одному из таких параметров – по среднему времени доставки данных от источника к получателю. Для количественного представления рисунок содержит зависимость вида "среднее время доставки – размер данных".

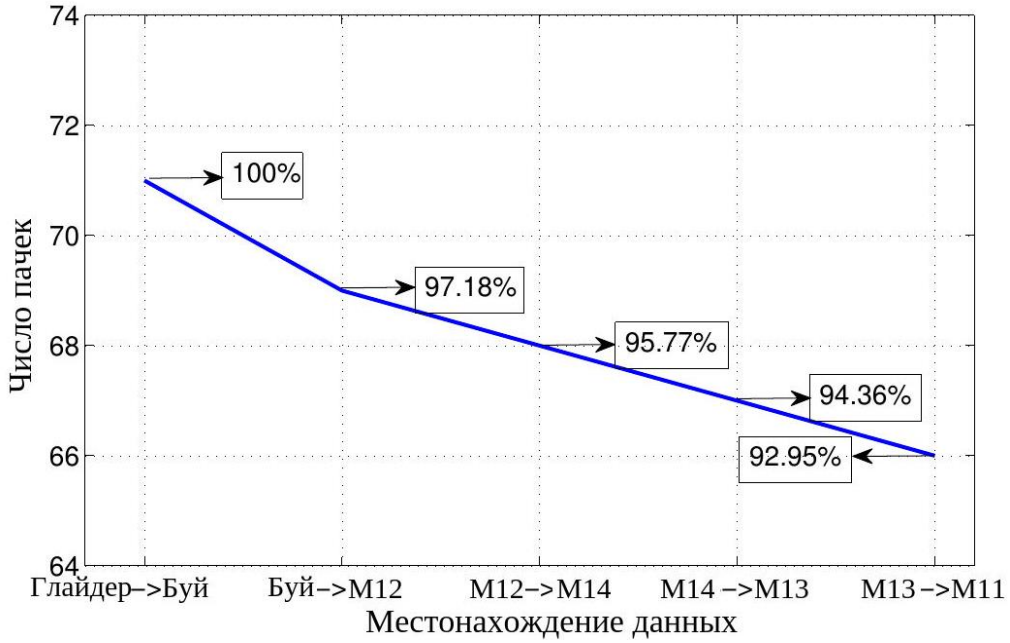


Р и с. 6. Среднее время доставки данных от источника к получателю

Как следует из рисунка, данные малых размеров (команды) требуют нескольких секунд для доставки получателю. Среднее время доставки данных размером более 64 байт быстро растет. Это объясняется тем, в случае передачи данных малого размера (до 64 байт) DMAC CL использует режим срочных сообщений модемного протокола D-MAC, не требующий установления соединения между узлами (двусторонний обмен для подтверждения открытия соединения отсутствует). В случае же передачи данных большего размера (более 64 байт) DMAC CL использует режим пакетной передачи модемного протокола D-MAC, требующий установления соединения между узлами, в частности, двустороннего обмена служебными сигналами для открытия соединения и

настройки сигналов физического уровня модема на текущие условия среды. Последовательное установление соединений между соседними узлами требует сравнительно большого времени и нивелируется только при передаче данных, размером порядка десятков килобайт и более. В этом случае время двустороннего обмена служебными сигналами становится значительно меньше времени передачи полезных данных: как видно на рис. 6 при возрастании размера сообщения кривая начинает изгибаться в сторону, характерную для эффекта “насыщения“ – становится более пологой.

Эксперимент выполнялся в течение 90 минут. Рис. 7 иллюстрирует путь между узлом-источником (Lisa) и узлом-получателем (modem-11) с указанием прогресса передачи данных каждым из узлов в фиксированный момент времени. В частности, на рис. 7 показан момент времени, к которому источник уже завершил передачу всех своих данных, т.е. 100% или 71 пачку, следующему узлу сети (заякоренному бую–шлюзу), который, в свою очередь, уже успел переслать далее 97.18% данных или 69 пачку. И так далее. Получатель данных – modem-11 – к этому моменту времени успел получить 92.95% данных или 66 пачек. В описываемом случае пачки передавались условиях относительно хорошей связи: в пакетном режиме D-MAC регистрировалось около 80% блоков, доставляемых от узла к узлу с первой попытки, остальные 20% блоков доставлялись автоматически по встроенному алгоритму повторной доставки поврежденных данных.



Р и с. 7. Прогресс передачи данных в сети (литера М – сокращение для Модем)

Для уменьшения времени передачи данных при использовании режима пакетной передачи может использоваться усовершенствованный подход, предполагающий реорганизацию очереди доставки пачек. Вместо характерной для DTN2 передачи каждой из пачек в каждой отдельной сессии (требующей установления соединения один раз на пачку) слой протоколов DMAC CL может быть доработан расширенными функциональными возможностями, позволяющими формировать кластеры из множества пачек так, чтобы весь кластер передавался за одну сессию. При этом время установления соединения будет усредняться числом пачек в кластере. Реализация такого похода требует более глубокой интеграции с программным обеспечением DTN2; на данный момент расширенные функциональные возможности конвер-

гентного уровня DMAC CL находятся в разработке.

Б. Сеть типа DTN для мобильных узлов сети – динамическая маршрутизация. В этой части раздела представлены экспериментальные результаты передачи данных в сети типа DTN в условиях изменяющейся геометрии сети.

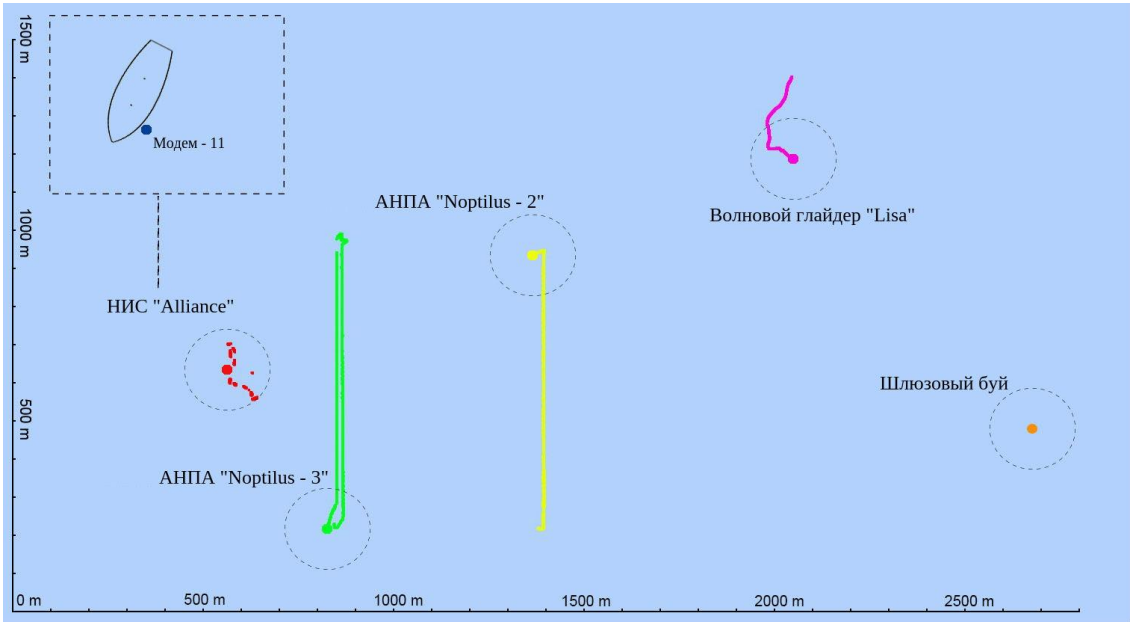
Сеть мобильными узлами состояла из пяти узлов (рис. 8), оснащенных гидроакустическим модемами:

– НИС “Alliance” с одним узлом (modem-11), служившим источником данных;

– заякоренный буй (Gateway Buoy), служивший конечным получателем данных;

– волновой глайдер (с названием Lisa), служивший промежуточным узлом;

– два автономных необитаемых подводных аппарата Noptilus-2 и Noptilus-3, также служившие промежуточными узлами.



Р и с. 8. Динамическая сеть (месторасположения и маршруты перемещений мобильных узлов динамической сети)

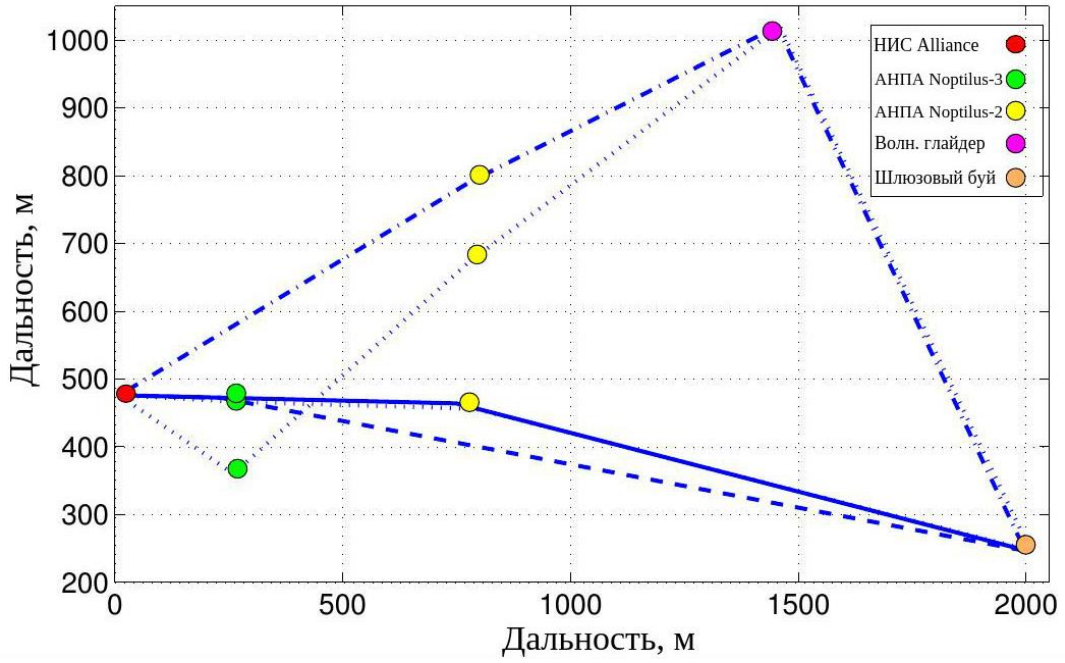
Особенность динамической маршрутизации состояла в том, что протокол DPF основывался на подходе, аналогичном тому, что применяется в протоколе "вытеснения и заполнения". В ходе поиска маршрутов доставки данных от источника к получателю протокол DPF обнаруживал и оценивал качество соединения между узлами сети, устанавливал в таблице взаимной "слышимости" показатели качества соединений, назначал всем текущим узлам "соседние" узлы и принимал решение о найденном (наилучшем) маршруте.

Дальность доставки данных составляла 2150 м. Волновой глайдер Lisa двигался медленно по малой окружности, слабо влияя на изменение геометрии сети и условий связи. В свою очередь, подводные аппараты Noptilus-2 и Noptilus-3 передвигались вдоль линии протяженностью 700 м, при этом варьируя глубиной в пределах от 0.1 до 9,8 м. Эти узлы время от времени выходили за пределы диапазона связи с другими узлами, затем возвращались, и таким образом оказывали значительное влияние на изменение геометрии сети. В таких условиях возникали разрывы в соединениях между узлами в течение продолжительного времени. Эти условия позволили провести ряд экспериментов с динамической маршрутизацией.

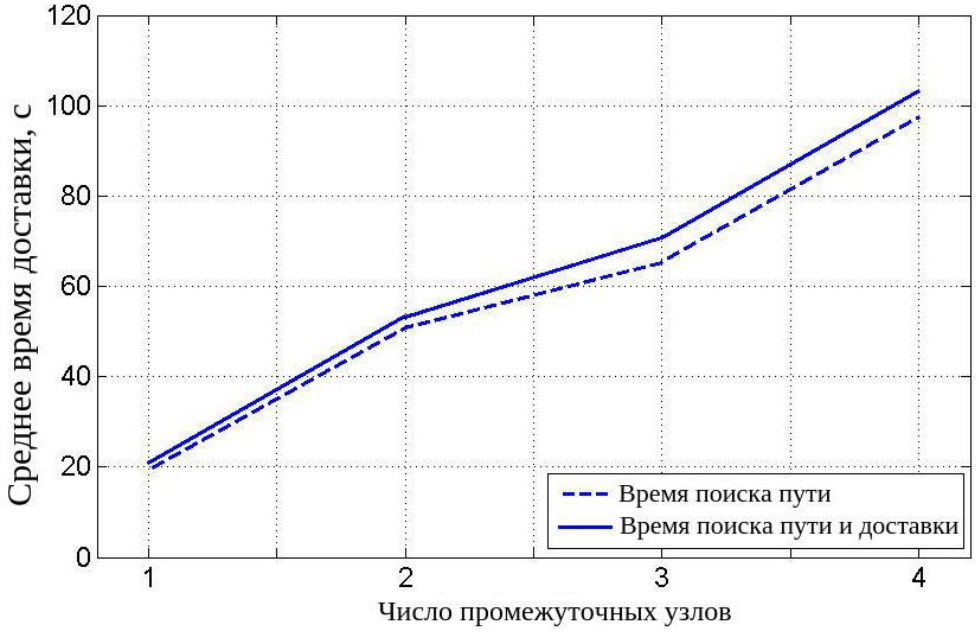
Рис. 9 содержит результаты работы внешнего сетевого уровня EviNS, в частности, динамического протокола маршрутизации DPF.

Как следует из рисунка, в изменяющихся условиях DPF обнаруживал различающихся пути, при этом число узлов на маршруте передачи данных изменялось от трех до пяти (от одного до трех узлов в промежутке между источником и получателем данных).

Для оценки производительности сети использовалось среднее время доставки данных от источника получателю. Рис. 10 демонстрирует среднее время доставки коротких сообщений (до 64 байт) для динамической сети, включающей от 5 узлов. Это время зависит от числа промежуточных узлов. Зависимость в первом приближении можно считать линейной (около 20 с на каждый промежуточный узел).



Р и с. 9. Маршруты между источником и получателем данных, найденные протоколом динамической маршрутизации DPF (по осям – дальности в метрах)



Р и с. 10. Среднее время поиска пути и доставки данных в динамической сети типа DTN

Штриховая линия показывает среднее время поиска пути в динамической сети. Сплошная линия показывает среднее время поиска пути с последующей доставкой данных. Как следует из рисунка, основное время тратилось на поиск пути. На собственно доставку данных по найденному пути тратилось существенно меньше времени. Это обстоятельство указывает направление дальнейшего развития, которое может состоять в разработке альтернативных подходов и алгоритмов поиска маршрутов доставки данных в динамических сетях, например, стохастических субоптимальных, основанных на построении отдельных интервалов маршрута (с использованием таблиц взаимной слышимости соседних узлов), вместо поиска и построения цельного пути от источника к получателю.

VI. Выводы. В статье представлены результаты интеграции проекта DTN2 и программного продукта EviNS (оба с открытым исходным кодом), исполняемых на аппаратной платформе гидроакустического модема технологии S2C производства компании Evologics.

Возможность исполнения программного обеспечения прямо на аппаратной платформе гидроакустического модема, исключает технические сложности, связанные с необходимостью интеграции дополнительного аппаратного обеспечения сети, в частности, дополнительного (внешнего) процессорного модуля, подводных кабелей и соединителей, дополнительных батарей, корпусов, и прочих элементов.

Продемонстрированы экспериментальные результаты работы сети типа DTN, обосновывающие возможность применения таких сетей в цифровой гидроакустической связи, как для оперативной передачи коротких сообщений (команд), так и сохранной передачи больших объемов данных в условиях гидроакустической среды, характеризуемой частыми разрывами соединений между соседними узлами.

Работа профинансирована в рамках седьмой рамочной программы ЕС (European 7th Framework Program), номер программы FP7-IST-2013-10 FIRE, проект SUNRISE, номер гранта 611449. Работа состоялась благодаря организационной и технической поддержке, а также предоставлению дорогостоящей логистики Центра морских исследований и экспериментов CMRE, Italy.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rodrigues J., Soares V.* “1 - an introduction to delay and disruption-tolerant networks (dtns),” in Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs), J. Rodrigues, Ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 1–21. [Online]. Электронный адрес размещения: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857098405500010 (дата обращения: 18.09.2015).
2. *Rahman R., Frater M.* “5 – delay-tolerant networks (dtns) for underwater communications,” in Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs), J. Rodrigues, Ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 81–103. [Online]. Электронный адрес размещения: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857098405500058 (дата обращения: 15.09.2015).
3. *Fall. K.* “A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets,” in Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. ACM Press, Aug. 2003, pp. 27–34. [Online]. Электронный адрес размещения: http://doi.acm.org/10.1145/863955.863960 (дата обращения: 15.09.2015).
4. *Eddy W.* “7 - assessing the bundle protocol (bp) and alternative approaches to

data bundling in delaytolerant networks (dtns),” in Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs), J. Rodrigues, Ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 139–157. [Online]. Электронный адрес размещения: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857098405500071 (дата обращения: 18.09.2015).

5. *Chuah M.C., Yang P., Davison B.D., Cheng L.* “Storeand-forward performance in a DTN,” in Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2006, 7–10 May 2006, Melbourne, Australia, 2006, pp. 187–191. [Online]. Электронный адрес размещения: http://dx.doi.org/10.1109/VETECS.2006.1682801 (дата обращения: 15.09.2015).
6. “*Delay*-Tolerant Networking Research Group (DTNRG),” электронный адрес размещения: https://sites.google.com/site/dtnresgroup/home. (дата обращения: 16.09.2015).
7. “DTN2 manual page,”, 2015, электронный адрес: http://dtn.sourceforge.net/DTN2/doc/manual/. (дата обращения: 16.09.2015).
8. *Kebkal O., Komar M., Kebkal K., Bannasch R.* “D-mac: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks,” in OCEANS, 2011 IEEE – Spain, june 2011, pp. 1–8.
9. *Kebkal O., Kebkal V., Kebkal K.* “Evins: Framework for development of underwater acoustic sensor networks and positioning systems,” in OCEANS, 2015 IEEE – Italy, may 2015, pp. 1–6.
10. *Rahman A., Olesinski W., Gburzynski P.* “Controlled flooding in wireless ad-hoc networks,” in Wireless Ad-Hoc Networks, 2004 International Workshop on. IEEE, 2004, pp. 73–78.
11. *Sasson Y., Cavin D., Schiper A.* “Probabilistic Broadcast for Flooding in Wireless Mobile Ad hoc Networks,” in Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003), 2003. [Online]. электронный адрес: citeseer.ist.psu.edu/article/sasson03probabilistic.html (дата обращения: 11.09.2015).
12. *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, 2007.
13. *Guerra F., Casari P., Zorzi M.* “World ocean simulation system (woss): A simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling,” in Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on UnderWater Networks, ser. WUWNet ’09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 4:1–4:8. [Online]. Электронный адрес: http://doi.acm.org/10.1145/1654130.1654134 (дата обращения: 11.09.2015).
14. *Peleato B., Stojanovic M.* “Distance aware collision avoidance protocol for ad-hoc underwater acoustic sensor networks,” Communications Letters, IEEE, vol. 11, no. 12, pp. 1025–1027, 2007.
15. *Syed A.A., Ye W., Heidemann J.* “Comparison and evaluation of the t-lohi mac for underwater acoustic sensor networks,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 26, no. 9, pp. 1731–1743, 2008.
16. *Сайт* компании “EvoLogics GmbH,” http://www.evologics.de/en/products/acoustics/index.html, 2015.