

УДК 681.883.45

ЭМУЛЯТОР СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

А. Г. Кебкал, К. Г. Кебкал, М. А. Комар

EvoLogics GmbH¹

Поскольку развертывание/свертывание и поддержание функционирования множества гидроакустических устройств связано с большими затратами времени и материальных средств, разработку и внедрение специализированных/пользовательских протоколов верхнего уровня целесообразно осуществлять с помощью развитых средств эмуляции функций гидроакустического устройства и имитации основных эффектов среды распространения гидроакустического сигнала. Статья описывает функциональные возможности реально-временного эмулятора интегрированного устройства цифровой гидроакустической связи и ультракороткобазового позиционирования EaNEF (Evologics acoustic Network Emulation Framework). Основное внимание уделено описанию эмулятора гидроакустического модема. Эмулятор обеспечивает поддержку всех функций канального уровня модема, а также включает в себя упрощенный имитатор физического уровня, обеспечивающий учет основных эффектов среды распространения сигнала, в частности, задержек его распространения при заданной пользователем топологии источников/получателей данных, эффект многолучевого распространения, интенсивность случайных коллизий пакетов данных при их приеме, позволяет задавать интенсивность сбоев синхронизации при приеме пакетов, интенсивности битовых и пакетных ошибок, учитывать траекторию и оценивать доплеровские сдвиги сигналов при движении источника/получателя данных. Таким образом, эмулятор заменяет физическое устройство на этапе разработки пользовательских сценариев, и на этапе разработки и тестирования протоколов и приложений верхнего уровня. Кроме того, эмулятор обеспечивает полнофункциональную поддержку механизма межуровневой синхронизации устройства, позволяющего разрабатывать пользовательские протоколы позиционирования удаленных абонентов связи, а также гибридные протоколы позиционирования и связи, управляемые протоколами верхнего уровня.

1. Введение

Современные гидроакустические (ГА) модемы являются сложными устройствами, предназначенными для решения широкого круга практических задач. Часто кроме приемопередатчика они также оснащаются решеткой гидрофонов, позволяющей выполнять ультракороткобазовое позиционирование удаленного абонента связи, что существенно упрощает решение задач по поддержанию формации и координированию маневров группы автономных необи-

таемых подводных аппаратов, точному позиционированию узлов распределенной ГА сети. Большинство из этих приложений являются уникальными, и каждое требует разработки сложного программного обеспечения с внедрением пользовательских протоколов для обмена данными между всеми отправителями/получателями. Программное обеспечение должно отвечать строгим требованиям по надежности и должно подвергаться всестороннему долгосрочному тестированию.

Существующие имитаторы сетей, например NS2Miracle [1], являются полезными инструментами для ознакомления и тренировок, но они не предоставляют достаточных средств для полноценной разработки программного обеспечения, в том числе проектирования алгоритмов, моделирования, верификации и тестирования целевой системы. Существенный шаг вперед был сделан с появлением нескольких рас-

¹ 13355 Berlin, Germany. Ackerstrasse 76. E-mail: kebkal@evologics.de

ширений имитаторов сети, таких как Sunset [2] и Desert [3], которые позволяют подключение не виртуальных, а физических устройств (ГА модемов) в рамках исследовательских стендов, обеспечивая замену процессов имитации физического и канального уровней ГА модемов на процессы, протекающие при функционировании физического устройства. Тем не менее такой подход имеет существенные недостатки. Многократное развертывание/свертывание оборудования в море в масштабе практического интереса для разработки пользовательских сценариев, моделирования и верификации моделей, первичного тестирования разработанных протоколов связано с множеством ограничений, в частности погодных, а также с множеством трудовых и материальных затрат. Кроме того, в существующих имитаторах сетей отсутствует адекватная поддержка физического и канального уровней протоколов коммерчески доступных ГА модемов. Это обуславливает необходимость разработки пользователем различных программ для работы на имитаторе и на физическом устройстве: разница в интерфейсах и форматах на имитаторе и при работе с аппаратными средствами обуславливает существенные различия в реализациях одного и того же протокола верхнего уровня.

В этой статье представлена разработка эмулятора EaNEF – реально-временного эмулятора интегрированного устройства цифровой ГА связи и ультракороткобазового позиционирования серии S2CR компании «EvoLogics». Эмулятор обеспечивает полнофункциональную эмуляцию канального уровня устройства серии S2CR и включает в себя упрощенный имитатор

физического уровня, обеспечивающий учет основных эффектов среды распространения сигнала, в частности, задержек распространения сигнала для заданной пользователем топологии источников/получателей, эффекта многолучевого распространения, интенсивности случайных коллизий пакетов данных при их приеме, позволяющий задавать интенсивность сбоев синхронизации при приеме пакетов, интенсивности битовых и пакетных ошибок, учитывать траекторию и оценивать доплеровские сдвиги сигналов при движении источника/получателя данных. Эмулятор способен полностью заменить набор физических устройств при разработке, верификации и тестировании пользовательских сценариев, например, может служить в качестве автономного решения для разработки и проверки пользовательских протоколов сетевого уровня. Эмулятор полностью поддерживает механизмы межуровневой синхронизации, реализованные в физических устройствах серии S2CR и, таким образом, позволяет разрабатывать пользовательские протоколы позиционирования, гибридные протоколы обмена данными и позиционирования участников сети, управляемые протоколами верхнего уровня.

В следующих разделах представлены сведения о возможностях использования пользовательских программ, разработанных с помощью эмулятора, на реальном аппаратном оборудовании – ГА модемах. Статья организована следующим образом. Раздел 2 описывает стек протоколов устройств серии S2CR. В разделе 3 представлена концепция эмулятора. В разделе 4 рассмотрены практические вопросы: от моделирования пользова-

тельских сценариев до морских испытаний. Раздел 5 описывает практический опыт применения эмулятора. В разделе 6 изложены планы по его развитию.

2. Стек протоколов ГА модемов серии S2CR

ГА модемы серии S2CR компании «EvoLogics GmbH» содержат следующие основные компоненты ГА: приемоизлучатель, силовой модуль (предусилитель и усилитель мощности), процессорный модуль, антенну с ультракороткой базой (опция), модуль «побудки» электроники модема – Wake Up (опция).

Физические характеристики приемоизлучателя определяют частотный диапазон и тип диаграммы направленности ГА модема и соответственно особенности их применения, для каждой из которых может быть рекомендована та или иная модификация. ГА модем содержит предусилитель и усилитель мощности, тщательно согласованные с характеристиками приемоизлучателя. Необязательный модуль ультракороткобазовой антенны представляет собой решетку из пяти гидрофонов, расположенных в одном корпусе с приемоизлучателем, а также пятисканальный предусилитель для гидрофонов антенны. Модуль «побудки» электроники модема – Wake Up – является дополнительным электронным модулем, позволяющим оптимизировать энергопотребление. При наличии этого модуля вся электроника модема, кроме модуля Wake Up, отключена от источника питания, и только после обнаружения электронного (со стороны аппаратного интерфейса) или ГА сигнала «побудки» электроника подключается к источнику питания и остается

ся во включенном состоянии на период обмена данными, после чего снова выключается.

Процессорный модуль состоит из АЦП, ЦАП, сигнального процессора и ПЛИСа, которые реализуют протокол физического уровня (далее по тексту – S2CPhy), а также двух дополнительных процессоров, реализующих протокол канального уровня D-MAC. Оба протокола описаны в разделах ниже.

Протокол физического уровня S2CPhy. На физическом уровне реализован метод модуляции сигнала, состоящий в непрерывном расширении спектра фазоманипулированного сигнала – Sweep Spread Carrier (S2C). Метод основан на предположении, что в ГА канале поступающий на прием сигнал хорошо описывается суммой лучевых компонентов со случайными амплитудами и фазами и профиль интенсивности многолучевого распространения является дискретным. Для таких условий наиболее перспективный подход к формированию сигнала связи состоит в расширении его спектра в широком диапазоне частот. Сигнал с расширением спектра характеризуется автокорреляционным откликом малой длительности. Причем чем больше расширение сигнала, тем короче отклик. После распространения в ГА канале принимаемый сигнал представляет собой сумму множества задержанных лучей и на выходе согласованного фильтра может быть представлен в виде ряда смещенных на разное время корреляционных откликов. Для сигналов с большим расширением спектра отклики могут быть изолированы и благодаря этому искажения, связанные с взаимодействием лучей, подавлены. В частности, фазовый шум изолированного луча может быть существенно осла-

блен. В идеализированном случае искажения сигнала равны искажениям (одного единственного) изолированного луча, обусловленным только шумом окружающей среды и доплеровским сдвигом (т.е. не спектром доплеровских частот, а одной единственной доплеровской частотой, ассоциированной с одним единственным путем распространения сигнала).

В отличие от того, что сегодня используются в цифровой ГА связи, сигнал, формируемый в соответствии с этой технологией, содержит два уровня модуляции: один – внутренний – для непрерывного изменения несущей частоты (аналоговая модуляция), второй – внешний – для задания сигналу информационного содержания (дискретная манипуляция). При ширине полосы частот от единиц до десятков килогерц длительность такого сигнала может составлять сотни микросекунд, а скорость передачи – от единиц до десятков килобит/с. Несмотря на такую высокую скорость передачи, приемник обычно способен успешно восстанавливать передаваемую информацию, т.к. вследствие непрерывной развертки несущей частоты мгновенные частоты задержанных лучевых компонентов принимаемого сигнала смещены по отношению к мгновенным частотам уже поступивших лучей, и вследствие этого частотно-селективные искажения принимаемого сигнала ослаблены. Это обуславливает более высокую достоверность, скорость и частотную эффективность передачи данных. Повышенная защищенность от помех (вследствие ослабления влияния задержанных лучей) позволяет также отказаться от протяженных антенн (формирователей диаграммы), что обуславлива-

ет снижение энергозатрат и габаритов приемопередающих устройств.

Основные процедуры, отличающие технологию S2C от других, осуществляются на физическом уровне – S2CPhy. Протоколы физического уровня реализованы на сигнальном процессоре и процессорной матрице ПЛИС и выполняют следующие функции:

1) оценку характеристик ГА канала:

- построение профиля интенсивности многолучевого распространения (оценки интенсивностей и избыточных задержек распространения лучей);

- выбор наиболее энергетического луча для синхронизации с ним приемника;

- определение задержки распространения и доплеровского сдвига наиболее энергетического луча;

2) кадровую и символьную синхронизацию:

- оценку времени начала и завершения пакета данных;

- оценку времени поступления каждого из сигналов последовательности (с учетом доплеровского сдвига);

3) модуляцию:

- форматирование передаваемых данных (преобразование последовательности байт в последовательность слов в соответствии с кратностью манипуляции, в частности, преобразование в последовательность битовых пар);

- задание формы сигнала в соответствии с выбранным способом модуляции (в частности, двукратной относительной фазовой манипуляции);

- задание формы сигнала в соответствии с формой развертки несущей;

4) демодуляцию:

- согласованную синхронную обработку принимаемых

сигналов с синфазной и квадратурной составляющими опорного сигнала;

- оценку комплексной огибающей принимаемого сигнала;
- оценку дискретного значения фазы принятого сигнала;
- определение битовой пары, соответствующей дискретному значению фазы принятого сигнала;

5) позиционирование:

- оценку импульсного отклика канала для выбора многолучевого компонента, соответствующего кратчайшему пути распространения сигнала;
- определение разницы во времени между фронтами ГА сигнала, поступающего на гидрофоны ультракороткобазовой антенны.

Протокол канального уровня D-MAC. Протокол канального уровня, называемый D-MAC, основан на множестве различных алгоритмов доставки данных, реализованных в ГА модемах технологии S2C. В соответствии с новейшим протоколом канального уровня поддерживается обмен двумя существенно различными типами данных: пакетных данных и срочных сообщений [4].

Пакетные данные. При установлении соединения для доставки пакетных данных требуется оценка параметров ГА канала. Как описано в [5], алгоритм доставки данных решает задачу оптимизации параметров передаваемого сигнала для данных условий канала, непрерывно адаптируя скорость передачи данных до максимально возможного значения при заданной пользователем допустимой интенсивности битовой ошибки. Все данные, получаемые от источника в буфер, динамически разбиваются на меньшие по размеру пакеты (в соответствии с текущими характеристиками канала).

На стороне приемника соответствующий алгоритм собирает пакеты, восстанавливает порядок их следования и посылает принятые данные получателю в исходном формате.

Срочные сообщения. Для доставки срочных сообщений установления соединения не требуется. Для передачи коротких срочных сообщений используется фиксированная скорость передачи данных (относительно низкая и приемлемая для широкого набора характеристик ГА канала [4]). Несмотря на сравнительно невысокую скорость передачи, устранение необходимости устанавливать сообщение сильно минимизирует время доставки короткого сообщения. Если соединение уже установлено другим источником данных, то доставка срочного сообщения не прерывает текущий процесс пакетной передачи данных, так как срочные сообщения доставляются в составе (как часть) служебного сообщения, сопровождающего каждую пачку пакетов. Срочное сообщение может иметь длину $O(10^2)$ бит.

На канальном уровне время доставки короткого сообщения может сокращаться, если отказаться от таких времязатратных процедур, как «рукопожатие» и адаптация сигнала к условиям среды распространения, а также если вести передачу на сравнительно небольшой фиксированной скорости связи так, чтобы вероятность появления неисправимых битовых ошибок оставалась бы пренебрежимо малой (эта мера снижает вероятность потерь времени на повторную пересылку поврежденных сообщений).

В частности, при выборе фиксированной скорости передачи данных выполнялся поиск компромисса между следующими противоречиями.

С одной стороны, требование достижения низкой вероятности битовой ошибки обуславливает снижение скорости передачи данных. С другой стороны, продолжительность сообщения должна быть меньше, чем время когерентности канала [6]. На основе результатов большого числа испытаний, скорость связи, обеспечивающая надежную передачу срочных сообщений для подавляющего большинства условий гидроакустических каналов, была выбрана 1 кбит/с. Такая скорость является минимальной среди тех, при использовании которых срочное сообщение не превышало временных ограничений, накладываемых характеристиками гидроакустических каналов. Она оказалась, в частности, оправданной при работе в ГА каналах с высокой динамикой характеристик, например, при осуществлении цифровой связи в мелководных водоемах между движущимися узлами ГА сети.

Срочные сообщения могут быть классифицированы в соответствии с типом адресации, наличием подтверждения доставки и требованием по синхронизации передачи. Срочные сообщения могут быть асинхронными и синхронными, и оба этих типа, в свою очередь, могут быть представлены надежными, одноадресными и ширококвещательными сообщениями.

В отсутствие текущего обмена пакетными данными между узлами ГА сети асинхронные срочные сообщения доставляются на основе схемы, подобной схеме ALOHA. Во время же обмена пакетными данными между узлами сети асинхронные срочные сообщения могут доставляться как часть служебного сообщения.

Управление доступом к среде для синхронных срочных

сообщений должно быть реализовано протоколом верхнего уровня. Для выполнения этой задачи D-MAC протокол обеспечивает пользовательский интерфейс для синхронизации с физическим уровнем, что позволяет протоколам верхнего уровня указывать время передачи синхронного срочного сообщения, а также получать сообщение о времени поступления такого сообщения в приемный тракт. Синхронные срочные сообщения не могут передаваться во время обмена пакетными данными.

3. Концепция эмулятора устройства цифровой ГА связи и позиционирования

Основными целями эмулятора модема являются сведение к минимуму затрат на разработку пользовательских протоколов верхнего уровня, а также упрощение и ускорение процесса интеграции ГА модемов с разнообразными источниками/получателями данных.

Основное внимание при конструировании эмулятора уделялось обеспечению возможности переноса разработанного на нем приложения на реальное физическое устройство без какого-либо изменения кода. Это обстоятельство определяло следующие требования к создаваемому эмулятору: 1) возможность реально-временной работы с большим числом узлов ГА сети, 2) идентичность исходного кода как для эмулятора, так и для «прошивки» на физическом устройстве, 3) одинаковый набор команд для эмулятора и физического устройства, 4) возможность удаленного доступа к эмулятору через Интернет.

Также обеспечение режима реального времени определялось одной из важнейших целей создания эмулятора.

Временные диаграммы работы на эмуляторе и на физическом устройстве должны были точно совпадать для обеспечения одинаковости работы протоколов верхнего уровня как на эмуляторе, так и на модеме. Следует принять во внимание, что протоколы верхнего уровня могут использовать функции модема как для обмена данными, так и измерения задержек распространения сигнала и соответственно для решения задач позиционирования параллельно с обменом данными или в его отсутствие.

«Прошивка» модема постоянно развивается с увеличением числа задач по интеграции ГА модемов с внешними сенсорами и системами, ассортимент которых быстро растет. Стек протоколов канального уровня представляет собой тот слой, который претерпевает наибольшее число изменений и является наиболее «видимым» для протоколов верхнего уровня. В связи с этим для обеспечения требования по идентичности исходного кода, запускаемого на эмуляторе и на процессорном стеке модема, подход к созданию эмулятора состоял в выделении платформенно-зависимой части кода в компактный драйвер, реализованный в двух вариантах, – один для прошивки модема, а другой для использования в эмуляторе. Следует отметить, что такой подход к созданию эмулятора также гарантирует идентичность набора управляющих команд, что для создания протоколов верхнего уровня делает неотличимой работу с эмулятором от работы с реальным модемом.

Множество экземпляров эмулятора ГА модема может быть сконфигурировано и одно временно запущено на сервере производителя или другом ре-

сурсе, например, для формирования сети. Каждый модем может быть доступен через TCP/IP сокет, что обеспечивает удаленный доступ пользователя ко всем ее элементам. Такой подход обеспечивает возможность гибкого обновления эмулятора и делает использование эмулятора независимым от платформы: пользователю не требуется никакого оборудования для установки и запуска эмулятора.

В соответствии с целями конструирования эмулятора его основными составляющими являются: 1) модуль канального уровня, 2) модуль управления обменом данными между канальным и физическим уровнями, 3) имитатор физического уровня, 4) имитатор ГА канала.

Как упоминалось выше, как эмулятор, так и реальный ГА модем используют одинаковый исходный код протокола канального уровня. Поддерживаемыми платформами, для которых может компилироваться исходный код, являются ARM, x86, x86_64. Такой подход экономит время и усилия, затрачиваемые на поддержку и развитие эмулятора, обеспечивает полную совместимость протоколов канального уровня эмулятора и реального модема, сокращает время интеграции модемов с сенсорными системами, быстрого достижения целей научно-исследовательских проектов, сокращает путь от моделирования до окончательных морских испытаний. Межуровневый интерфейс между канальным и физическим уровнями обеспечивается драйвером ядра Linux, реализующим платформенно-зависимый код, специфичный для аппаратной части ГА модема. Этот код обеспечивает низкоуровневый доступ к интерфейсу обмена данными канального и физи-

ческого уровней. В эмуляторе этот драйвер перенаправляет запросы протокола канального уровня в пользовательское пространство имитатора физического уровня и от имитатора назад к протоколу канального уровня. Такое исполнение с разделением на платформенно-зависимый код и платформенно-независимый (POSIX-совместимый) код обеспечивает возможность работы одного и того же кода на платформе эмулятора и на платформе реального ГА модема.

Влияние ГА среды имитируется ответами на запросы протокола канального уровня в соответствии со спецификацией на межуровневый интерфейс. Пользовательскими параметрами работы имитатора являются, в частности, трехмерные координаты каждого из модемов, а также вероятности битовых ошибок при обмене данными между ними. Имитатор направляет данные, предназначенные для передачи, диспетчеру, который начинает процесс обмена данными между эмулируемыми модемами. Имитатор составляет метки времени и координаты отправителя на каждый из передаваемых пакетов. После поступления данных от диспетчера имитатор физического уровня имитирует задержку распространения сигнала, удерживая пакет в очереди на передачу в течение тайм-аута, соответствующего дальности распространения сигнала между координатами эмулируемых модемов, а также детектирует коллизии, забраковывая соответствующие пакеты данных (считая их неисправимо поврежденными). Кроме осредненной по глубине скорости звука, эмулятор обеспечивает возможность задания вертикального разреза скорости звука предоставляя таким образом

возможность разработки и тестирования пользовательских приложений, способных учитывать вертикальный разрез скорости звука, например, для повышения точности позиционирования удаленных абонентов связи.

Последняя составляющая имитатора ГА канала представляет собой диспетчер пакетов канального уровня. Основная функция этой составляющей состоит в получении пакетов от протокола канального уровня и их перенаправлении к имитатору/имитаторам физического уровня, подключенным к диспетчеру.

4. От эмуляции к морским испытаниям

В большинстве публикаций по протоколам цифровой связи, разработанным для ГА сетей, экспериментальные результаты были получены на широко известных имитаторах сетей NS2 и NS3. Результаты же, получаемые в ходе работ в реальной ГА среде, например в озере или в море, являются редкими исключениями. Одним из важнейших препятствий для проведения физических экспериментов является их высокая стоимость, в частности, стоимость подводного оборудования и стоимость работы обеспечивающего судна. Кроме этого есть также другой сдерживающий фактор, а именно существенное различие между протоколами, создаваемыми для моделирования при работе с имитаторами сетей, и протоколами, создаваемыми для выполнения экспериментальных работ с использованием физических устройств.

Существенный шаг вперед для перехода от моделирования к физическим экспериментам был сделан с выпуском интегрированных сред, реали-

зующих протоколы сетевого уровня, в частности, недавно выпущенных открытых релизов Sunset и Desert, основанных на расширении NS2-Miracle [1] и уже способных к работе с физическим оборудованием. Однако оказалось, что даже с использованием этих релизов выполнение экспериментов является реалистичным лишь в лабораторных стендовых условиях. Проведение же полномасштабных физических испытаний в условиях открытого моря оказалось малореалистичным. Дело в том, с ростом числа узлов ГА сети время на их развертывание и свертывание на большом пространстве, а также доступ к каждому из устройств для выполнения всевозможных настроек занимает основную часть времени, обычно отводимую на эксперименты, так что на выполнение собственно задач по разработке пользовательских приложений времени не остается. Кроме того, в силу вступают ограничения по погоде, наличию необходимой логистики, организационные сложности по подготовке и проведению морских экспериментов.

Таким образом, обнаружился серьезный недостаток недавно созданных интегрированных сред, реализующих протоколы сетевого уровня, состоящий в отсутствии возможности подключения к ним вместо физического устройства эмулятора полнофункционального ГА модема.

Эмулятор интегрированной системы цифровой гидроакустической связи и позиционирования EaNEF при подключении его к интегрированным средам, реализующим протоколы сетевого уровня, устраняет необходимость трудоемкого развертывания физических устройств в реальной среде,

по крайней мере, на начальных этапах разработки и тестирования пользовательских приложений, а количество и масштабы возможных тестовых сценариев могут увеличиваться произвольно. В частности:

- эмулятор позволяет задавать произвольные расстояния и соответственно задержки пространства между узлами ГА сети (что является достаточно сложным при развертывании реальных модемов на сравнительно больших расстояниях – расстояниях наибольшего практического интереса);

- эмулятор поддерживает в реальном времени тестирование большого числа ГА акустических модемов – узлов ГА сети – за один раз, в то время как уже само приобретение за один раз десятков модемов, аккумуляторов, буев, якорных цепей и других аксессуаров представляется непозволительной роскошью для большинства организаций – разработчиков сетевых протоколов и других пользовательских приложений;

- эмулятор полностью поддерживает межуровневый интерфейс модемов и межуровневые механизмы синхронизации, необходимые для реализации пользовательских протоколов позиционирования, таким образом существенно снижая трудозатраты для разработки и тестирования реальных приложений на различных этапах работы;

- имитатор физического уровня обеспечивает обнаружение коллизий; задание пользователем вероятностей ошибки демодуляции и ошибок синхронизации позволяет тестировать приложения и протоколы верхнего уровня для использования в различных условиях эксплуатации и отлаживать программное обеспечение без привлечения дорогостоящих

ГА устройств и другого подводного оборудования.

Следующим шагом, упрощающим путь от моделирования до морских испытаний, стал выпуск специальной версии ГА модемов белой линии (White Line Science Edition). Они предоставляют пользователю специальную «прошивку» с размещением открытого для пользователя экспериментального пространства «sandbox», позволяющего пользовательские приложения и протоколы верхнего уровня (скрипты и/или программы) запускать прямо в процессорном модуле модема. В частности, в экспериментальном пространстве могут запускаться скрипты TCL/Expect, например для быстрого прототипирования тестовых сценариев и приложений, или пользовательские приложения, написанные на Erlang или C/C++, или протоколы, написанные в рамках интегрированных сред Sunset, Desert, UNET.

5. Опыт использования

Эмулятор ГА модема серии S2CR подвергался бета-тестированию на протяжении почти трех лет. Различные университетские группы получали доступ к эмулятору для разработки и отладки протоколов верхнего уровня и подготовки к совместным экспериментам. Кроме того, коммерческие заказчики приобретали доступ к эмулятору для ознакомления с интерфейсами и функциями ГА модемов, а также разработки скриптов, позволяющих интегрировать модемы с их сенсорными системами задолго до поставки физических устройств.

В августе 2012 года авторы статьи провели ряд совместных испытаний с группой SIGNET из университета Падуи (Италия). Целью исследования была

проверка динамического протокола маршрутизации SUN, разработанного группой SIGNET специально для ГА сетей и представленного в работе [8]. В ходе подготовки к морским испытаниям группе предоставлялся доступ к эмулятору ГА модема. Посредством удаленного доступа они использовали его для отладки и тестирования протокола SUN в рамках интегрированной среды, реализующей протоколы сетевого уровня, NS-Miracle. Благодаря тщательной отладке программного обеспечения на эмуляторе непосредственная подготовка и переход к морским экспериментам с использованием физических устройств прошли без осложнений, что обеспечило возможность исследования большого набора пользовательских сценариев за короткое время в реальных условиях ГА канала [8]. В течение экспериментов [8], группа участников подтвердила практичность применения эмулятора и сделала следующие выводы:

- эмулятор представляет собой средство обучения, так как он позволяет получить опыт работы с обширным набором AT команд, поддерживаемых ГА модемами серии S2CR;

- эмулятор обеспечивает возможность конструирования и тщательной отладки программ, предусматривающих сложное взаимодействие с модемом. Так, эмулятор может быть использован для верификации и совершенствования высокоразвитых сетевых протоколов и приложений, включающих в себя многократные обмены сообщениями с модемом, например, в соответствии с алгоритмом сконструированного пользователем конечного автомата;

- эмулятор позволяет верифицировать собственные сете-

вые протоколы и/или приложения в отсутствие физических модемов, напрямую связанных с компьютером разработчика, при этом число виртуальных (эмулируемых) модемов может быть произвольно большим и работа с эмулятором может выполняться через удаленный доступ;

- эмулятор позволяет планировать и уточнять сценарии экспериментов до их проведения на реальном оборудовании;

- использование эмулятора экономит время отладки и верификации кода: очевидно, что изменение кода на персональном компьютере выполняется быстрее, чем изменение и проверка кода на платформе модема;

- приложения, разработанные и протестированные на эмуляторе, быстро экспортируются на процессорную платформу реального ГА модема.

6. Перспективы развития

Эмулятор ГА модема находится в состоянии постоянного развития, поскольку растущий опыт его применения

обуславливает появление новых конструктивных идей для усовершенствования исходной концепции. Воспользовавшись эмулятором, партнеры и заказчики способствовали появлению идей по развитию и внедрению следующего:

- переход от настройки параметров эмулятора из командной строки к настройке через веб-утилиту (графический конфигуратор);

- разработка графического конструктора, позволяющего создавать и визуализировать различные топологии ГА сети;

- разработка инструмента визуализации журнала событий, позволяющего просматривать и анализировать, например, потоки пакетов, временные и пространственные диаграммы поврежденных пакетов, коллизий и прочее;

- разработка средств пользовательской параметризации ошибок синхронизации и демодуляции в зависимости от расстояния между узлами ГА сети;

- разработка средства для запуска эмулятора в качестве виртуальной машины на компьютере пользователя.

7. Выводы

Создание полнофункционального эмулятора ГА модема открывает широкие возможности для разработки и исследования протоколов верхнего уровня и других приложений, использующих ГА модемы. Возможность тестирования и отладки приложений на эмуляторе ГА модема позволяет существенно сократить затраты на разработку и повысить надежность решения, так как вложения времени в тестирование и отладку могут быть существенно больше, чем в период проведения работ в открытом море. Опыт использования эмулятора как во время внутреннего тестирования, так и в рамках партнерского сотрудничества доказал целесообразность его использования для решения широкого круга прикладных задач. Эмулятор может быть использован либо в качестве автономного решения для исследования и сравнения различных подходов и протоколов верхнего уровня, либо в качестве дополнительного инструмента для ускорения процесса их разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. The network simulator -ns-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/> User Information.
2. Petrioli C., Petroccia R., Shusta J., Freitag L. From underwater simulation to at-sea testing using the ns-2 network simulator // OCEANS-2011. IEEE-Spain. 2011. June. P. 1–9.
3. Masiero R., Azad S., Favaro F., Petrani M., Toso G., Guerra F., Casari P., Zorzi M. Desert underwater: An ns-miracle-based framework to design, simulate, emulate and realize test-beds for underwater network protocols // OCEANS-2012-Yeosu. 2012. May. P. 1–10.
4. Kebkal O., Komar M., Kebkal K., Bannasch R. D-mac: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks // OCEANS-2011. IEEE-Spain. 2011. June P. 1–8.
5. Kebkal O. On the use of interwoven order of oncoming packets for reliable underwater acoustic data transfer // OCEANS-2009-EUROPE. 2009. May. P. 1–7.
6. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications. Prentice-Hall PTR, 2001. 1079 p.
7. Kebkal K. G., Bannasch R. «Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation // The Journ. of the Acoust. Soc. of America. 2002. Vol. 112, № 5. P. 2043–2052.
8. Toso G., Masiero R., Casari P., Kebkal O., Komar M., Zorzi M. Field experiments for dynamic source routing: S2Cevologics modems run the sun protocol using the DESERT underwater libraries // MTS/IEEE OCEANS-2012. 2012. October.