

АКТУАЛЬНЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ГИДРОАКУСТИ- ЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДОСТУПА

Панкратов Ф. С.¹, Малахов И. М.²
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Большая задержка распространения сигналов, сильное влияние отражённых сигналов и, как следствие, высокая вероятность ошибки и низкая скорость передачи данных являются отличительными чертами подводных акустических сетей связи. В таких условиях для построения беспроводной подводной сети доступа необходима разработка специальных протоколов управления доступом к среде, так как многие современные сетевые протоколы, разработанные для наземных сетей радиосвязи, в подводной среде имеют чрезвычайно низкую эффективность. В статье проведен обзор актуальных и перспективных способов построения беспроводных подводных сетей доступа в подводной акустической связи. Проанализированы протоколы управления доступом к среде на основе расписания и на основе конкуренции, подходящие для организации подводной гидроакустической сети. Приведено описание протокола ALOHA и его модификаций (ALOHA-CA и ALOHA-AN), протоколов с механизмом определения несущей FAMA и Slotted FAMA, улучшенного протокола MACAW, протоколов UW-MAC и Tone Lohi. Выбор протокола для использования его в рамках развёртываемой сети является важной задачей при проектировании сети. В статье приводится сравнение протоколов и указывается, в каких системах можно было бы применить эти протоколы. В конце работы приводится анализ возможных сценариев применения различных протоколов в подводной акустической связи и идеи для дополнительных исследований в рамках работ по разработке протоколов управления доступом к среде.

Ключевые слова: подводная акустическая связь, гидроакустическая связь, протоколы управления доступом к среде, Slotted FAMA, UW-MAC, Tone Lohi.

1. Введение

Задача обеспечения передачи цифровой информации в подводной среде с каждым годом становится всё более актуальной.

¹ Филипп Сергеевич Панкратов, аспирант (alphalionbyte@hotmail.com).

² Илья Михайлович Малахов, аспирант (froztgal@gmail.com).

Сети подводной акустической связи (underwater acoustic, UWA) имеют много особенностей, отличающих их от сетей пакетной радиосвязи. Основными отличительными характеристиками гидроакустического канала являются большая задержка распространения сигналов в совокупности с постоянно меняющейся многолучевостью и малой полосой пропускания, обусловленными низкой скоростью звука в подводной среде, сильно зависящей от глубины [1].

Ввиду специфических условий распространения акустических сигналов под водой, протоколы доступа к среде, разработанные для наземных радиоканалов, либо неприменимы, либо имеют чрезвычайно низкую эффективность. Поэтому для построения эффективных подводных акустических систем проектировщикам сетей и сетевых протоколов приходится учитывать обозначенные выше специфические условия и разрабатывать специализированные протоколы управления доступом к среде (Medium Access Control, MAC).

Главная задача протоколов доступа в сети заключается в обеспечении стабильного функционирования беспроводной сети, включающей несколько сетевых узлов, разделяющих одну среду для передачи, а также в обеспечении эффективного использования ресурса общего канала за счет минимизации негативного эффекта от коллизий (конфликтов передачи) [2]. Дополнительно к этому они позволяют обеспечить минимизацию энергии, необходимой для передачи сообщений, что важно для многих систем связи, особенно для сетей датчиков с автономным (батарейным) питанием.

Применение современных протоколов MAC в подводной среде позволяет развёртывать большие сенсорные сети (сети датчиков) [29]. Эти сети могут использоваться для сбора данных об океане, состоянии инфраструктуры под водой, климатических изменениях, уровнях загрязнения водной среды, а также в системах уведомления о стихийных бедствиях и для помощи при разведке минеральных ресурсов.

С другой стороны, во многих гидроакустических системах задача организации эффективного доступа к среде является большим вызовом [19, 21, 23]. В связи с этим повышение эф-

фективности протоколов доступа и разработка специализированных протоколов доступа сегодня является одной из наиболее актуальных задач в области гидроакустической связи.

Для исследования новых механизмов в протоколах доступа к среде необходим сравнительный анализ существующих протоколов и проблем, которые неизбежно возникнут при разработке данных протоколов для подводной среды. В данной статье приведен обзор и анализ эффективности различных протоколов доступа к среде в подводных гидроакустических сетях, а также приводятся возможные направления будущих исследований.

2. Протоколы управления доступом к среде

Как было отмечено выше, основной проблемой являются конфликты передачи, которые приводят к снижению скорости, а также к дополнительному расходу энергии автономными подводными аппаратами ввиду необходимости неоднократной повторной передачи для гарантированной доставки сообщений.

Для решения этой проблемы существуют протоколы управления доступом к среде. По принципу работы их можно разделить на две основные группы: протоколы на основе конкуренции и протоколы на основе расписания. В протоколах на основе конкуренции для нескольких узлов сети используется один канал связи, выделяемый по запросу, тогда как в протоколах на основе расписания доступ к каналу выделяется только на один сетевой узел и на конкретно отведённый промежуток времени.

В первом случае попытка доступа к среде связи часто может привести к коллизиям, однако назначение таких протоколов не исключит их возникновения, но минимизирует их вероятность. В протоколах на основе расписания принцип организации доступа состоит в предварительном выделении ресурсов конкретному пользователю согласно определённому правилу [35].

Частотный ресурс в среде подводной акустической связи ограничен, и протоколы доступа к среде должны рационально использовать этот ресурс для организации связи. Вследствие низкой скорости распространения сигналов в акустической сре-

де коллизии возникают гораздо чаще, чем в радиочастотной среде. Применение специальных механизмов доступа к среде позволяет повысить пропускную способность сети и снизить энергозатраты, а дополнительно – свести к минимуму возможность перехвата и несанкционированного управления трафиком [32].

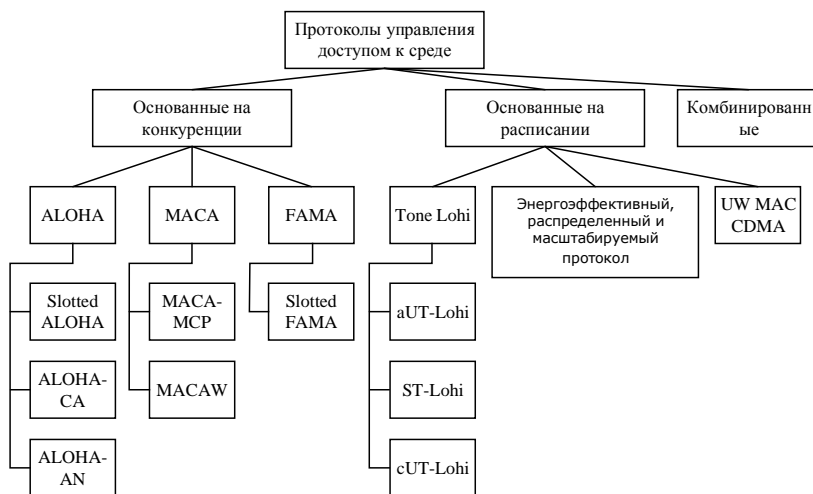


Рис 1. Структурная схема протоколов управления доступом к среде

Для передачи информации в подводной среде используются акустические волны, в связи с чем при разработке протоколов MAC должен быть рассмотрен ряд проблем, таких как длительная задержка распространения сигналов, ограниченная полоса пропускания, многолучевое распространение, замирания и, как следствие, сравнительно большая частота ошибок. Также немаловажным является тот факт, что зачастую (особенно в сетях подводных датчиков) вычислительный ресурс также ограничен. Таким образом, протоколы MAC, применяемые в наземных сетях, будут работать неэффективно. В работе [25] авторами проведён большой сравнительный анализ алгоритмов и протоколов MAC в подводной среде в современных реалиях. Также автора-

ми предложены механизмы для увеличения пропускной способности подводной сети, выведенные математическим анализом.

3. Протоколы на основе протокола ALOHA

Среди протоколов доступа к среде существует семейство протоколов, основанных на протоколе ALOHA. Протокол ALOHA построен по принципу конкурентного доступа к среде. В изначальной реализации протокола отсутствуют механизмы предотвращения конфликтов при передаче. Сетевой узел начинает передачу данных сразу, как только появится необходимость отправки сообщения. В ответ на это получатель отправляет сообщение подтверждения АСК (acknowledgment), если данные были получены без ошибок. Однако если пакет подтверждения не приходит, передача считается неуспешной и данные отправляются вновь спустя небольшой случайный промежуток времени. Это значительно увеличивает количество коллизий. Для гарантированной доставки сообщения осуществляется многократная передача одних и тех же пакетов данных. Как следствие, снижается эффективная пропускная способность сети (отношение полезного времени передачи, т.е. времени, когда канал занят непосредственно передачей полезной (не служебной) информации, к общему времени передачи). Базовый протокол ALOHA при определённых условиях обеспечивает максимальную эффективную пропускную способность не более 18% [6]. Решение проблемы коллизий было предложено в дальнейшем развитии исходного протокола ALOHA – в протоколе Slotted ALOHA [22]. В новом протоколе введено понятие тайм-слотов, а передача пакетов ограничена этими временными интервалами. Данные передаются только в начале нового тайм-слота, время и период тайм-слотов синхронизированы между сетевыми узлами. Благодаря этому удалось сократить количество коллизий, а согласно [8] общая пропускная способность протокола Slotted Aloha в два раза выше, чем у базового протокола ALOHA при тех же условиях – 36%.

В работе [33] анализируются проблемы и ограничения применимости протоколов ALOHA и Slotted ALOHA в среде под-

водной акустической связи. Там же приведён анализ применимости протоколов ALOHA и Slotted ALOHA для сети подводных акустических датчиков UWASN. Так как значительная задержка распространения акустических сигналов в подводной среде приводит к проблемам управления и синхронизации работы сетевых узлов, это сводит к минимуму достоинства протокола, такие как простота реализации, отсутствие дорогого оборудования, а также снижает пропускную способность сети [13]. В случае использования протокола Slotted ALOHA нет никакой гарантии своевременной доставки сообщений в заданные временные интервалы. В работе [5] проанализированы проблемы и предложены основные принципы моделирования протоколов управления доступом к среде на основе конкуренции. Представлена модель, позволяющая проводить анализ применения протокола ALOHA при развёртывании сети с небольшим количеством узлов. Проведённое моделирование показывает, что в случае применения протокола Slotted ALOHA в подводной связи пропускная способность сети сравнима с использованием базового протокола ALOHA при тех же условиях.

Главная цель исследований по улучшению этого семейства протоколов – внедрение эффективных механизмов по предотвращению коллизий. Проводились исследования для реализации протоколов, основанных на протоколе ALOHA для UWASN. В результате этих исследований появились две усовершенствованные версии протокола: ALOHA with collision avoidance (ALOHA-CA) и ALOHA with avoidance notification ALOHA-AN. В работе [10] приведено описание этих версий протокола ALOHA, а также рассматривается производительность и надёжность работы протоколов на основе ALOHA в подводной среде. Протокол ALOHA-CA является более выгодным с точки зрения масштабируемости сети и простоты реализации. В данном протоколе исключается необходимость в специальных дополнительных управляющих сообщениях, а для физической реализации требуются меньшая вычислительная мощность и меньший объём быстродействующей памяти. Протокол ALOHA-AN, наоборот, требует дополнительного расхода памяти и вычислительных ресурсов, но способен обеспечивать меньшее количе-

ство коллизий в процессе передачи. Это достигается при помощи предварительной отправки дополнительных пакетов с уведомлением о передаче соседним узлам (NTF), что позволяет избежать одновременной передачи пакетов, которая могла бы привести к коллизии. Результаты моделирования, представленные в [3], показывают, что обе усовершенствованные версии теоретически могут повысить пропускную способность сети, так как снижается количество коллизий. Более того, применение протокола ALOHA-AN уменьшает количество повторных передач и связанных с ними вычислений.

В работе [17] авторами исследуется производительность и пропускная способность протоколов ALOHA в подводной среде и проводится моделирование в среде MATLAB. Авторы приходят к выводу, что скорость распространения сигнала в среде не влияет на пропускную способность протокола ALOHA. Помимо этого авторы заявляют, что протокол Slotted ALOHA чувствителен к задержке распространения сигналов и, следовательно, работает хуже в подводной среде по сравнению с Slotted ALOHA в наземных системах.

4. Протоколы на основе CSMA

Другим семейством протоколов доступа к среде являются протоколы множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий (CSMA, Carrier Sense Multiple Access). Принцип организации протоколов на основе CSMA рассмотрен в работе [28]. В протоколах CSMA, в отличие от протоколов ALOHA, учитывается текущее состояние канала в процессе передачи. В таких протоколах передача ведётся одновременно только одним сетевым узлом, а порядок следования передачи данных узлами определён специальной очередью. Перед началом передачи узел производит контроль наличия несущей в среде передачи. Этот этап называется фазой обнаружения несущей и позволяет узлу определить, ведётся ли в данный момент передача другими узлами в среде. В случае если обнаружена уже ведущаяся передача, то узел ожидает случайное время и повторяет попытку вновь. В противном случае передачу начинает сам

сетевой узел. При этом всё же существует вероятность возникновения ситуации, когда два и более узла могут одновременно начать передачу. В этом случае возникает коллизия и все передаваемые данные искажаются. Это обнаруживается узлами, так как одновременно с передачей они также прослушивают среду и сравнивают передаваемые данные с получаемыми. При обнаружении коллизии передача немедленно останавливается, а обнаружившие коллизию узлы передают в среду так называемую «преднамеренную» помеху. Эта помеха распознаётся другими узлами, и они также немедленно останавливают передачу. Каждый узел ждёт произвольное количество времени и производит попытку повторной передачи. Для подтверждения корректности передачи сообщения узел-адресат отправляет специальное сообщение подтверждения АСК (acknowledgment). Если сообщение АСК не было получено, передача считается неудачной и начинается повторная передача.

Протоколы на основе CSMA также являются протоколами на основе конкуренции. Исследование, проведённое в работе [34], выявило некоторые проблемы реализации CSMA в подводных акустических сетях связи, связанные с многолучёвостью и большими задержками распространения сигналов, несмотря на то, что оно проводилось для использования в наземных акустических сетях. Протоколы на основе CSMA позволяют снизить количество коллизий, однако подвержены проблеме «скрытого узла».

Проблема скрытого узла возникает, когда один или более узел связи не может гарантированно знать о занятости среды передачи и удалённого узла и начинает отправлять данные. Такая ситуация показана на рис. 2. Кругами на рисунке показана дальность действия передатчиков узлов А, Б и В. Узлы А и В «слышат» узел Б, но не «слышат» друг друга, и могут одновременно начать передачу, что приведёт к коллизии сигналов на приёме узла Б.

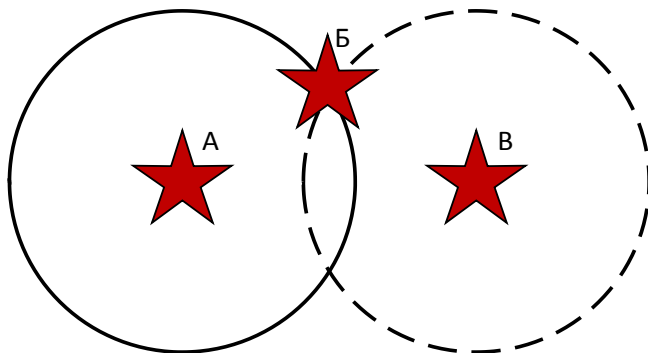


Рис. 2. Проблема скрытого узла

Также существует проблема «незащищённого узла». Эта проблема возникает, когда сетевой узел вынужден задерживать отправку своих пакетов данных из-за занятости среды другой передачей, которой в действительности он не мешает. Описанная ситуация показана на рис. 3.

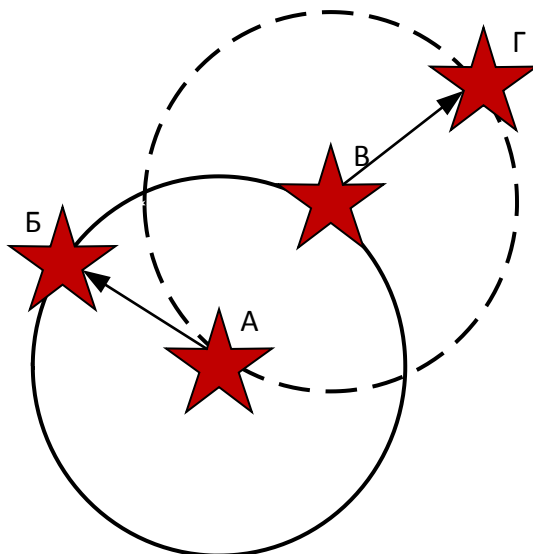


Рис. 3. Проблема незащищённого узла

Узел А отправляет данные узлу Б, а узлу В требуется отправить данные узлу Г. Кругами на рисунке показана дальность действия передатчиков узлов А и В. Передача данных узлом В никак не может помешать приёму данных узлом Б, однако узел В вынужден задерживать отправку данных, так как «слышит» передаваемый сигнал узла А.

Стабильная работа протокола CSMA сильно зависит от доступности канала узла-адресата всем прочим узлам, расположенным в его зоне приёма, так как служебное сообщение CTS (Clear To Send) должно быть принято всеми узлами. Помимо этого проблема скрытого узла не может быть решена без добавления защитного промежутка времени между сообщениями, которое зависит от максимального времени распространения сигналов в сети. В протяжённых сетях подводной связи (около 10 км для протоколов CSMA) могут возникать значительные задержки передачи информации: при максимальной скорости в 1 кбит/с и размером пакета данных 1000 бит задержка передачи информации составит примерно от 1 с до 6,7 с [27]. Из-за таких задержек канал связи будет простаивать большую часть времени, что приведет к низкой пропускной способности сети в целом.

Проблемы протокола CSMA, описанные выше, можно решить при помощи введения специального алгоритма перед передачей данных, называемого «рукопожатием». Такой алгоритм был предложен в протоколе с предотвращением конфликтов множественного доступа MACA в [16]. В начале передачи пакета данных узел отправляет служебное сообщение «запроса разрешения на отправку» RTS (Request-To-Send), в котором содержится адрес получателя. Если узел-получатель готов принять сообщение, то он отправляет широковещательное служебное сообщения подтверждения передачи CTS, в котором содержится адрес отправителя. Так как это сообщение получают все узлы в радиусе действия узла-получателя, они не начнут передачу своих сообщений, так как в данный момент среда будет занята другим узлом. Временная диаграмма процесса рукопожатия показана на рис. 4.

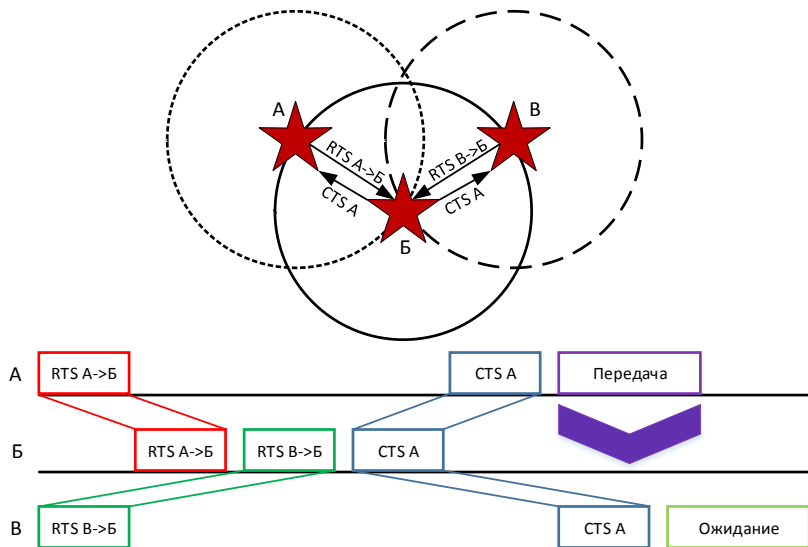


Рис. 4. Временная диаграмма процесса рукопожатия

Для того чтобы сетевые узлы, работающие по протоколу MACA, могли передавать пакеты данных, не вызывая коллизий, должны выполняться некоторые условия, описанные авторами работы [12]. Однако всё же остаётся проблема «ближнего узла», когда один узел находится значительно ближе к узлу-адресату, чем другой, и запрос от дальнего узла может помешать процессу рукопожатия у ближних узлов.

В работе [7] авторами предложен модифицированный протокол MACA – MACAW (MACA-Wireless). Основное отличие данного протокола от исходного – наличие механизма автоматического запроса повторной передачи ARQ, который позволяет повторно передавать ошибочные пакеты DATA. Дополнительно этот протокол позволяет динамически подбирать время задержки передачи для увеличения пропускной способности сети. Подробное описание работы протокола авторы приводят в работе [11]. Перед передачей данных производится соответствующий запрос (RTS). Передача (DATA) начинается после получения специального пакета разрешения передачи (CTS). Это поз-

воляет защитить пакет данных от повреждений при коллизии. В конце передачи принимающий узел отправляет подтверждающее сообщение ACK. В протоколе MACAW также существуют проблемы коллизий. Так, пакет RTS может прийти в момент передачи пакета данных DATA. Эта проблема решается при помощи так называемой серии пакетов. Тогда коллизия пакетов будет приводить к повреждению только одного пакета DATA, о чём будет сообщено в ответном пакете ACK, и ошибка будет исправлена. Увеличение числа пакетов данных в серии пакетов при использовании протокола MACAW может значительно повысить эффективность работы сети [26].

Реализация протокола в UWASN должна поддерживать одновременное получение нескольких запросов на отправку при наличии множества сетевых узлов в среде. Существуют также комбинированные версии протокола, в которых используется протокол на основе MACAW со специальным механизмом «рукопожатия», последовательности RTS – CTS – DATA – ACK и контролем несущей [26]. Дополнительные механизмы обмена информацией о местоположении между узлами, а также создания и контроля последовательной пакетной передачи позволяют выделить новый, более производительный и интеллектуальный протокол MACA-MCP. Данный протокол может применяться для создания самоорганизующейся сети с несколькими каналами связи для автономных подводных аппаратов (AUV).

5. Протокол FAMA

Так же, как и протокол MACAW, ещё одним представителем семейства протоколов с конкурентным доступом к среде является подходящий для организации сети подводной акустической связи протокол FAMA, описанный в работе [18]. В протоколе применены механизмы определения несущей, недоступные в MACA и MACAW, а также процедуры обмена информацией между двумя узлами до передачи полезной информации. Однако должны быть выполнены два условия: длина пакета RTS (продолжительность отправки и ожидания подтверждения) должна выбираться исходя из максимального времени распро-

странения сигнала в среде, а длина пакета CTS должна превышать длину пакета RTS в совокупности с удвоенным временем распространения сигнала в среде и средним временем обработки одного сообщения на оборудовании узла. Выполнение этих двух условий было заложено в основу протокола FAMA. Механизм ARQ поддерживается протоколом FAMA за счёт отправки специальных пакетов ACK или пакетов отказа подтверждения NACK.

Так как, исходя из условий, длина пакета зависит от времени распространения сигнала в среде, ввиду большой задержки распространения сигнала в подводной акустической сети (примерно 1 с на 1,5 км) длина управляющих пакетов RTS и CTS становится очень большой. Это увеличивает затраты времени и энергии для передачи в среде, но гарантирует отсутствие коллизий. Следовательно, использование протокола FAMA в исходной реализации для подводной акустической сети является неэффективным. Данная проблема решается в оптимальной версии протокола FAMA с разделением времени передачи на временные интервалы – Slotted FAMA. Принцип работы нового протокола заключается в том, что любое сообщение, как служебное, так и сообщение с полезной нагрузкой, может передаваться только в рамках свободного тайм-слота. Передача ведётся синхронно и узлы гарантированно могут знать, ведётся ли одновременная передача другими узлами в непосредственной близости с ними. Дополнительно разработчиками протокола предлагается увеличить продолжительность тайм-слота добавлением защитного времени для учёта возможных неточностей в работе часов и таймеров узлов сети.

Специально для подводной акустической сети связи в работе [14] авторами был предложен протокол M-FAMA. Протокол позволяет сетевому узлу одновременно поддерживать несколько каналов связи с другими сетевыми узлами. Благодаря использованию нескольких приемников достигается временное и пространственное разделение, что позволяет повторно использовать сетевой ресурс и эффективно предотвращать коллизии. Работа механизмов протокола направлена на достижение максимальной пропускной способности, при этом теряется возможность

максимально быстрой передачи «точка – точка» (так как протокол будет стараться дать возможность передачи всем сетевым узлам), что может мешать работе в разнонагруженной сети. Например, когда один сетевой узел передаёт сжатое видео с бортовых камер, а второй – лишь свою телеметрию. Таким образом, первому требуется значительно больший канал связи, нежели второму. Для решения этой проблемы авторами был предложен механизм полностью распределенного управления Bandwidth Balancing, при котором снижено количество передаваемых служебных данных, что гарантирует стабильность высокоскоростной передачи данных в схеме «точка – точка» в произвольных топологиях сети. Моделирование, проведённое авторами в работе, показало, что M-FAMA превосходит наиболее популярные подводные протоколы MAC при потоковой передаче. В качестве возможных дальнейших исследований авторы видят изучение динамического протокола M-FAMA, в котором будет существовать механизм быстрого переключения между различными способами составления расписания и внутренними механизмами протокола в условиях постоянно меняющейся нагрузки на сеть и топологии сети.

6. Протоколы управления доступом к среде на основе расписания

В работе [4] описан протокол ACMENet, обеспечивающий функционирование системы мониторинга прибрежной подводной среды. Акустическая коммуникационная сеть для мониторинга подводной среды в прибрежных районах (АСМЕ) – проект, в рамках которого была разработана система, способная работать в распределённых сетях подводных датчиков и автономных аппаратов. Протокол работает по принципу «ведущий – ведомый» и предназначен для сетей UWASN различных топологий малого или среднего размера. Протокол управления доступом к среде реализован на основе определённого на этапе конфигурации сети расписания, благодаря чему пакеты данных передаются от ведомых устройств к ведущим последовательно, не мешают друг другу и не вызывая коллизий. Существует так-

же возможность кластеризации сети для увеличения пропускной способности и обеспечения отказоустойчивости (например, субведущие узлы – те, что могут принять на себя роль ведущего в случае отказа основного узла, а также выполняют задачи маршрутизации и управления трафиком, – или центры кластеров, принимают и отсеивают множество служебной или необходимой только локально информации, передавая ведущему узлу только необходимые ему пакеты). Благодаря применению схемы с кодовым разделением каналов имеется возможность одновременной передачи узлами сигналов, являющихся ортогональными по отношению друг к другу. Протокол также поддерживает возможность адаптивного регулирования мощностей передатчиков, частот и скоростей модуляции на ведомых узлах. Передача завершается широковещательной рассылкой специальных управляющих пакетов для дальнейшей синхронизации и арбитража (составления расписания передачи).

По схеме с кодовым разделением каналов CDMA можно построить распределенный протокол управления доступом к среде для подводной акустической сети датчиков. Такой протокол, названный UW-MAC, был предложен в работе [30]. В основе протокола лежит принцип обратной связи между датчиками и главным узлом связи, благодаря которой появляется возможность подбирать оптимальную мощность передатчика и скорости передачи. Согласно выводам, сделанным авторами работы [30], протокол UW-MAC способен обеспечить высокую пропускную способность сети с минимальными задержками и низким энергопотреблением в условиях глубоководной связи (влияние многолучевости и переотражений невелико). В случае организации сети доступа в условиях мелководья, где влияние отражённых сигналов велико, протокол должен обеспечивать работу сети, снижая пропускную способность или увеличивая задержки.

Другой интересной разработкой является энергоэффективный протокол, разработанный для подводной акустической сети датчиков малого радиуса действия. Главная цель, стоявшая перед разработчиками этого протокола, заключалась в том, что необходимо было создать энергоэффективный протокол, обес-

печивающий стабильный доступ к среде передачи при условии малой мощности бортового передатчика и небольшого энерго-ресурса на борту. Протокол Tone Lohi, описанный в статье [30], обеспечивает выполнение этих требований благодаря механизмам резервирования каналов, гарантирующим отсутствие коллизий между сообщениями при передаче. Помимо программной реализации, протокол подразумевает наличие специального оборудования, имеющего функцию пробуждения по тональному сигналу. Таким образом достигается решение проблемы конфликтов при резервировании каналов без необходимости больших энергозатрат.

Существуют также три различные реализации данного протокола: ST-Lohi (синхронизированный T-Lohi), обеспечивающий наиболее энергоэффективную передачу (согласно моделированию, приведённому в той же работе, протоколом достигается эффективность в пределах 3% от максимального значения), aUT-Lohi (Aggressive Unsynchronized T-Lohi), позволяющий организовать максимальную из трёх реализаций пропускную способность (полезное использование канала ~ 50%), и cUT-Lohi (консервативный несинхронизированный T-Lohi), который обеспечивает наиболее надёжную передачу данных практически без потерь. Согласно выводам авторов, все три реализации позволяют эффективно использовать среду передачи, обеспечить стабильную пропускную способность и высокую энергоэффективность.

Также существует реализация энергоэффективного, распределенного и масштабируемого протокола, описанного в работе [23]. Авторы предполагают использования протокола в условиях длительных и постоянно изменяющихся задержек распространения сигнала. Область применения этого протокола – приложения, допускающие длительные задержки в передаче, например, сенсоры на трансокеанских подводных кабелях, системы экологического контроля и т.п.

Важной особенностью протоколов, основанных на расписании, является задача обеспечения функционирования сети при минимальных энергозатратах, что отличает эти протоколы от

описанных ранее протоколов с конкурентным доступом к среде передачи.

7. Комбинированное применение протоколов и их гибридные реализации

Существуют также варианты реализации множественного доступа к среде с использованием современных наработок по мобильным самоорганизующимся сетям [24]. Теоретически такой подход должен обеспечивать масштабируемость сети, а также увеличивать пропускную способность сети и эффективность её работы за счет пространственного разнесения каналов передачи и повторного использования ресурсов каждого канала. Так, общая структура сети представляет собой совокупность кластеров, передача в каждом из которых ведётся по принципу временного разделения TDMA. Между этими кластерами применяется кодовое разделение CDMA, что позволяет повторно использовать одни и те же тайм-слоты в разных и даже соседних кластерах сети. Дальнейшая масштабируемость сети достигается за счет дополнительного повторного использования кодов CDMA в достаточно разнесённых в пространстве кластерах сети.

8. Заключение

Наиболее важными показателями подводной системы связи являются отказоустойчивость, пропускная способность, максимальная дальность связи и энергетическая эффективность. В зависимости от целей и задач проектирования системы подводной связи можно применять различные протоколы для достижения наилучшей комбинации этих показателей.

Протокол UW-MAC в совокупности с кодовым разделением каналов позволяет добиться высокой пропускной способности и энергетической эффективности за счёт повторного использования каналов и временного разделения каналов. Может использоваться как в глубоководных сетях связи, так и на мелководье. Описан в работах [20] и [30].

Протокол Tone Lohi использует специальные механизмы перехода в режим энергосбережения оборудования и пробуждения/запроса сетевого ресурса специальным тональным акустическим вызовом, благодаря чему может значительно экономить энергию подводных аппаратов. Может быть применён в сетях автономных датчиков и сетях с низкими требованиями к скорости канала. В сетях с высокой нагрузкой протокол также обеспечивает хорошие показатели по отказоустойчивости и пропускной способности. Описан в работах [29] и [31].

Отдельный интерес представляет энергоэффективный, распределенный и масштабируемый протокол, описанный в работе [23]. Такой протокол может быть применён в сети с большим количеством узлов (например, десятки и сотни датчиков и стационарных автономных аппаратов). Как и протокол Tone Lohi, данный протокол позволяет выполнять перевод узлов в режим энергосбережения и их дальнейшее пробуждение, однако ввиду использования механизмов обеспечения доступа к среде, основанных на расписании, протокол обладает низкой пропускной способностью. Такой протокол может быть улучшен применением дополнительного пространственного разделения каналов, введением промежуточных таблиц маршрутизации, а также комбинированием с механизмами протокола Tone Lohi.

Протокол Slotted-FAMA обладает хорошей масштабируемостью и управляемостью. В совокупности с дополнительными механизмами, как показано в статьях [9, 15, 18], протокол может применяться в сетях, где требуется построение интеллектуальных подводных сетей связи. Большой размер сети и гибкие возможности по маршрутизации и отслеживанию состояния карты сети позволяют применять данный протокол для многих целей в подводной среде.

Улучшенный протокол MACAW с механизмами определения несущей и серией пакетов является эффективным с точки зрения масштабируемости и пропускной способности. Механизмы динамического регулирования размера пакетов и мощности передатчиков позволяют протоколу стабильно работать в быстро меняющихся условиях, например, при обследовании автономными подводными аппаратами прибрежной подводной

зоны с постоянно меняющейся глубиной. Он может применяться для создания небольших самоорганизующейся сетей для автономных подводных аппаратов. Описан в работе [26].

Модификации протокола ALOHA, ALOHA-CA и ALOHA-AN могут применяться для дальнейших исследований и разработок протоколов доступа к среде с целью улучшения характеристик. При разработке протоколов авторы сделали основной упор на снижении количества служебных сообщений, а также на увеличении энергоэффективности: пакеты данных не отправляются, если информация не занимает полностью пакет данных (установленный размер в сети, но до определённого предела) или пакет может вызвать коллизию. Описан в работах [16] и [27].

Для изучения применимости и возможностей протоколов требуются дополнительные исследования, о которых будет сказано в заключении данной работы. Подробное описание канального уровня, классификация MAC протоколов, а также обзор механизмов этих протоколов для сетей подводных акустических датчиков приведены в работе [19].

В работе [21] авторы провели реальные эксперименты в Атлантическом океане. В эксперименте развёртывалась сеть с девятью сетевыми узлами, использовалась распределённая топология сети. В этом эксперименте принимали участие три протокола доступа к среде: ALOHA, SASHA на основе квитирования и протокол конвейерной передачи на основе планирования (PTMAC). Последние два протокола выходят за рамки данной работы, но подробно рассматриваются в работе [21]. Также протоколы сравниваются и анализируются как на уровне формирования сообщений, обработки пакетной передачи, так и на уровне работы сетевых узлов (на физическом уровне). Пропускная способность сети с использованием этих трех протоколов изучается с точки зрения задержек распространения сигналов, и количества потерянных сообщений и пакетов. Результаты, приводимые авторами, показывают частоту потери пакетов и повреждения сообщений, а также асимметрию канала и сложность определения наилучшего времени ожидания и длины пакетов.

В приведённом обзоре были рассмотрены разработки протоколов управления доступом к среде и технологий для сетей подводной акустической связи. Дальнейшая работа должна быть сосредоточена на построении и улучшении интеллектуальных алгоритмов поддержания работоспособности и самоорганизации сетей. Поиска решения требуют также проблемы оптимальной длины тайм-слотов и пакетов, периода отложенной отправки и выбора протокола, обеспечивающего наилучшее соотношение пропускной способности, задержки и энергоэффективности передачи.

Литература

1. БРЕХОВСКИХ Л.М., ЛЫСАНОВ Ю.Л. *Теоретические основы акустики океана*. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
2. ВИКУЛОВ А.С., ПАРАМОНОВ А.И. *Введение в сети WI-FI с высокой плотностью пользователей* // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – С. 12–20.
3. КЕБКАЛ К.Г., КЕБКАЛ В.К., КЕБКАЛ А.Г., МИНАЕВ Д.Д., ЛЕОНЕНКОВ Р.В., КОРЫТКО А.С. *Экспериментальная оценка характеристик цифровой подводной сети на основе гидроакустических модемов с программным каркасом EviNS* // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26, ч. 3 (103). – С. 121–135.
4. ADAMS A.E., ACAR G. *An acoustic network protocol for sub-sea sensor systems* // Europe Oceans. – 2005. – Vol. 1. – P. 172–176.
5. BAE Y.H. *Modeling Timely-Delivery Ratio of Slotted Aloha With Energy Harvesting* // IEEE Communications Letters. – 2017. – Vol. 21, No. 8. – P. 1823–1826.
6. BERTSEKAS D., GALLAGER R. *Data Networks*. – NJ: Prentice Hall, 1992.
7. BHARGHAVAN V., DEMERS A., SHENKER S., ZHANG L. *MACAW: A media access protocol for wireless LANs* // Proc. of the SIGCOMM Conference, London, UK, 31 August – 2 September, 1994. – P. 212–225.

8. BURATTI C., ZANELLA A., VERDONE R. *Throughput analysis of Slotted Aloha multiple hop systems with Virtual Antenna Arrays* // Future Network & Mobile Summit. – 2010. – P. 1–8.
9. CASARI P., TOMASI B., ZORZI M. *A comparison between the Tone-Lohi and Slotted FAMA MAC protocols for underwater networks* // OCEANS'2008, Quebec City, Qc, Canada, 15–18 September 2008. – P. 1–8.
10. CHIRDCHOON N., SOH W.-S., CHUA K.C. *ALOHA-based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks* // 26th IEEE Int. Conf. on Computer Communications INFOCOM-2007, 6–12 May 2007, Anchorage, Alaska, USA. – P. 2271–2275.
11. FOO K.Y., ATKINS P.R., COLLINS T., MORLEY C., DAVIES J. *A routing and channel-access approach for an ad hoc underwater acoustic network* // OCEANS'04, MTS/IEEE Techno-Ocean'04 (IEEE Cat. No.04CH37600), Kobe, Japan, 9–12 Nov. 2004. – Vol.2 – P. 789–795.
12. FULLMER C.L., GARCIA-LUNA-ACEVES J.J. *Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks* // SIGCOMM Computer Commun. – 1995.
13. GIBSON J.H., XIE G.G., XIAO Y., CHEN H. *Analyzing the Performance of Multi-hop Underwater Acoustic Sensor Networks* // Proc. MTS/IEEE Conference OCEANS'2007, Aberdeen, Scotland, 18–21 June 2007. –P. 1–6.
14. HAN S., NOH Y., LEE U., GERLA M. *M-FAMA: A multi-session MAC protocol for reliable underwater acoustic streams* // Proc. of the IEEE INFOCOM-2013, Turin, Italy, 14–19 April, 2013 - Turin, Italy– P. 665–673.
15. HUANG W., LIU M., ZHANG S. *A Slotted FAMA based MAC Protocol for Multi-Hop Underwater Acoustic Networks with a Multiple Reception Mechanism* // 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 25–27 July, 2018, – P. 7315–7321.
16. KARN P. *MACA – A new channel access method for packet radio* // SIGCOMM computer commun. rev. 25, 4, New York, NY, USA, 4 October 1995. – P. 262–273.

17. MANDAL P., DE S., CHAKRABORTY S.S. *Characterization of Aloha in underwater wireless networks* // National Conference on Communications – 2010 (NCC-2010), Chennai, India, 29–31 January, 2010. – P. 1–5.
18. MOLINS M., STOJANOVIC M. *Slotted FAMA – A MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks* // Proc. of the Int. Conf. on Communication, Electronics and Automation Engineering, Singapore, 16–19 May 2006. – P. 1291–1297.
19. NGUYEN H.T., SHIN SY., PARK SH. *State-of-the-Art in MAC Protocols for Underwater Acoustics Sensor Networks* / In: Emerging Directions in Embedded and Ubiquitous Computing. EUC-2007. Lecture Notes in Computer Science / Eds.: Denko M.K. et al. – 2007. – Vol. 4809. – P. 482–493.
20. POMPILI D., MELODIA T., AKYILDIZ I.F. *A Distributed CDMA Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks* // IEEE Trans. on Wireless Communications, 8. – 2009. – Vol. 4. – P. 1899–1909.
21. PU L., LUO Y., MO H. et al. *Comparing underwater MAC protocols in real sea experiment* // Computer Communications. – 2018. – Vol. 56. – P. 1–9.
22. ROBERTS L.G. *ALOHA packet system with and without slots and capture* // ACM SIGCOM Comput. – 1975. – P. 28–42.
23. RODOPLU V., PARK M.K. *An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Wireless Acoustic Networks* // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2006. – Vol. 32, Iss. 3. – P. 710–720.
24. SALVA-GARAU F., STOJANOVIC M. *Multi-cluster protocol for ad hoc mobile underwater acoustic networks* // OCEANS'2003. Celebrating the Past Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492), San Diego, CA, USA, 22–26 September 2003, – Vol. 1. – P. 91–98.
25. SEEMA A. *Analysis of MAC Strategies for Underwater Applications* // Springer Science. – 2015. – Vol. 82. – P. 359–376.
26. SHAHABUDEEN S., CHITRE M., MOTANI M. *A multi-channel MAC protocol for AUV networks* // OCEANS'2007 – Europe, Aberdeen, Scotland, 18–21 June 2007. – P. 60867–60876.

27. SMITH S. M., PARK J.C. *A peer-to-peer communication protocol for underwater acoustic communication* // OCEANS'97, Halifax, Nova Scotia, Canada, 6–9 October 1997. – P. 268–272.
28. SOHRABY K., MINOLI D., ZNATI T. *Wireless Sensor networks: Technology, Protocols, and Applications*. – Wiley Publication, Chichester, 2007.
29. SYED A.A., YE W., HEIDEMANN J. *T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks* // The 27th IEEE Conf. on Computer Communications INFOCOM-2008, Phoenix, AZ, USA, 15–17 April 2008. – P. 231–235.
30. TAN H., SEAH W.K. G. *Distributed CDMA-based MAC Protocol for Underwater Sensor Networks* // 32nd IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN-2007), Dublin, Ireland, 15–18 October 2007. – P. 26–36.
31. VALERIO V.D.; PRESTI F.L.; PETRIOLI C.; PICARI L.; SPACCINI D. *A self-adaptive protocol stack for Underwater Wireless Sensor Networks* // OCEANS'2016, Monterey, CA, USA, 19-23 September 2016. – P. 995–1022.
32. VARGHESE J., RAO S.V. *Energy efficient exponential decision MAC for energy harvesting-wireless sensor networks* // Int. Conf. on Advances in Green Energy (ICAG), Thiruvananthapuram, India, 17–18 December 2014. – P. 239–244.
33. VIEIRA L.F.M., KONG J., LEE U., GERLA M. *Analysis of ALOHA protocols for underwater acoustic sensor networks* // The First ACM International Workshop on UnderWater Networks WUWNet, Extended abstract from WUWNet, 1-8 September 2006. – V. 6. – P. 1–13.
34. ZHANG J., HUANG Z., LIU X. *Acoustic Communication in Wireless Sensor Networks* // Department of Computer Science University of Virginia, CS651. – 2005. – P. 1–8.
35. ZHANG Y., ZHENG S., XIONG S. *A Scheduling Algorithm for TDMA-Based MAC Protocol in Wireless Sensor Networks* // First International Workshop on Education Technology and Computer Science, Wuhan, China, 7–8 March 2009. – P. 148–151.

ACTUAL AND PERSPECTIVE METHODS OF CONSTRUCTING WIRELESS ACCESS NETWORKS IN UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION

Philipp Pankratov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, postgraduate student (alphalionbyte@hotmail.com).

Ilya Malakhov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, postgraduate student (froztdgal@gmail.com).

Abstract: The large delay in the propagation of signals, the strong influence of reflected signals and, as a result, the high probability of error rate and low data transfer speed are distinctive features of underwater acoustic communication networks from packet radio networks. In such circumstances, the construction of a wireless underwater access network requires the development of special media access control protocols, since many advanced network protocols developed for terrestrial radio networks had extremely low data transmission efficiency in an underwater environment. This article provides an overview of available solutions for promising methods of building a wireless access network in underwater acoustic communication, which are schedule-based and competition-based media access protocols. The ALOHA protocol and its modifications (ALOHA-CA and ALOHA-AN), protocols with the carrier determination mechanism (FAMA and Slotted FAMA), the improved MACAW protocol, UW-MAC and Tone Lohi protocols are also described in this article. Deciding on which protocol to use within a deployable network is an important task in network design. The article provides a comparison of protocols and proposes a way of analyzing in which systems these protocols could be applied. At the end of the work, an analysis of possible scenarios for the application of various protocols in the underwater acoustic communication environment and ideas for additional research in medium access control protocols development was provided.

Keywords: underwater acoustic communication, medium access control protocols, Slotted FAMA, UW-MAC, Tone Lohi.

УДК 004.7 + 654.9

ББК 39.478

DOI: 10.25728/ubs.2021.91.5

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

Поступила в редакцию 02.02.2021.

Опубликована 31.05.2021.