

УДК 681.883:004.722.4:534-14|045

**Плахотный Н.В.**, канд. техн. наук  
**Тихановский В.В.**  
**Кебкал А.Г.**

## **ОСОБЕННОСТИ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПОДВОДНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

**Национальный технический университет Украины «КПИ»**

*Рассмотрена задача надежной широковещательной передачи данных в подводной акустической сенсорной сети, проанализированы существующие протоколы широковещательной доставки данных и соответствующие методы доступа к каналу, методы множественного доступа и проблемы кодирования данных для решения задач мультимедиа*

### **Введение**

В течение последних десятилетий наблюдается постоянный рост интереса к подводной акустической связи в приложениях в области морских исследований, океанографии, в коммерческих применениях на нефтедобывающих платформах в море, в оборонном секторе. Подводные сенсорные сети способны обеспечить возможность реализации таких задач, как сбор океанографических данных, мониторинг загрязнения окружающей среды, геологическая разведка и поиск полезных ископаемых, сейсмологический мониторинг, предупреждение стихийных бедствий.

Подводные акустические сенсорные сети включают в себя подводные стационарные сенсоры сбора данных и автономные подводные аппараты, совместно обеспечивающие выполнение задач сбора данных в рамках целевой миссии. Подводные сенсорные узлы должны обладать свойствами самонастройки для адаптации к изменяющимся свойствам подводной среды, т.е. должны быть способными координировать свои действия по обмену конфигурацией, следить за расположением и передвижением других узлов и обеспечивать передачу собранных данных на материк. Однако, на сегодняшний день протоколы связи подводных акустических сетей находятся в ранней стадии развития и многие аспекты мало исследованы. Так, задача надежной широковещательной

доставки данных для подводных акустических сетей практически не изучена исследователями за исключением работ [6] и [9], хотя данная задача является одной из базовых с точки зрения развития протоколов подводной связи.

Каналом передачи данных для подводных сенсорных сетей является акустический канал, поскольку радиоволны распространяются в соленой воде на относительно большие дистанции лишь на сверхнизких частотах (30-300 Гц) и требуют создания передатчиков большой мощности излучения. Оптические волны, как еще одна альтернатива, не так подвержены высоким замираниям, но подвержены рассеянию, а передача оптических сигналов требует высокой точности настройки направления узконаправленных лазерных лучей.

Толчком к развитию технологий подводной связи послужило также то, что существующие системы не удовлетворяют многим современным требованиям. Традиционные подходы мониторинга дна и толщи океана состоят в установке подводных сенсоров, записывающих данные в течение продолжительного времени с последующим извлечением измерительного оборудования. В частности, в таких системах нет возможности своевременного реагирования на изменения наблюдаемого объекта или среды, автоматической или управляемой перенастройки сенсоров и систем раннего обнаружения ошибок на

первоначальном этапе выполнения работ.

Первые публикации относительно исследования вопросов создания подводных сенсорных сетей стали появляться не более десятилетия назад. Из-за сложности гидроакустического канала связи и существенных отличий его характеристик от традиционных наземных беспроводных сетей передачи данных на сегодняшний день не выработано четких и стандартизированных протоколов физического и канального уровней передачи данных.

К основным сложностям разработки подводных акустических сетей можно отнести следующие [1]:

- быстрое затухание и рассеяние;
- доступная полоса пропускания жестко ограничена;
- многолучевое распространение и затухание с высокой динамикой изменения параметров распространения;
- задержка распространения акустического сигнала на пять порядков выше задержки распространения радиоволн;
- значительное доплеровское рассеяние;
- высокая стоимость подводных сенсоров из-за относительно малого числа поставщиков оборудования;
- ограниченный ресурс батарей при отсутствии возможности использования солнечной энергии;
- высокий риск выхода из строя подводных узлов, вызванный коррозией, обрастанием ракушками и водорослями, возможностью затекания и обрыва соединительных кабелей.

Затухание в гидроакустическом канале связано в основном с абсорбцией, вызванной превращением акустической энергии в тепло. Затухание возрастает с увеличением расстояния и частоты, возникает из-за рассеивания, реверберации (из-за негладкой поверхности моря или дна), рефракции и дисперсии [2].

Структура многолучевого распространения зависит от геометрии канала связи. Вертикальные каналы обычно характеризуются небольшой длительностью многолучевой интерференции, в то время

как горизонтальные каналы могут иметь экстремально продолжительную во времени многолучевую структуру. Многолучевое распространение возникает по причине переотражений звуковых волн относительно поверхности моря, дна, термоклинов.

Шум вследствие человеческой активности (движение кораблей, лодок), а также природный естественный шум (движение воды, дождь) тоже влияет на качество акустической передачи, особенно на небольшой глубине [4].

### **Принципы построения компьютерных сетей**

Компьютерные сети обычно имеют многоуровневую архитектуру [5]. В соответствии с классификацией *OSI* первыми тремя уровнями являются физический, канальный и сетевой. Именно данные уровни более всего подвержены влиянию подводной среды и требуют новых подходов, учитывающих ее характеристики.

Физический уровень отвечает за преобразование битов в сигнал и его передачу через канал связи и восстановление значения битов из принятого сигнала.

Канальный уровень группирует биты в кадры, добавляя при этом контрольную сумму. Кадры обычно содержат адреса отправителя и получателя. Если контрольная сумма кадра не совпадает с принятой, получатель может автоматически запросить кадр повторно, если это предусмотрено протоколом канального уровня. Кроме того, к задачам канального уровня относится также обеспечение доступа к среде. К известным примерам протоколов доступа к среде относятся протокол случайного доступа *Aloha*, протокол с контролем несущей (*CSMA*), протокол *Token Ring*.

Задачей сетевого уровня является маршрутизация пакетов от отправителя к получателю. На сегодняшний день разработано множество алгоритмов маршрутизации, которые можно разделить на два основных класса: неадаптивные и адаптивные. Кроме маршрутизации сетевой уровень может предоставлять верхнему,

транспортному, уровню два основных вида сервиса: с установлением соединения и без него. В компьютерных сетях преобладает второй вид.

Важным решением при проектировании сети является также выбор ее топологии, которая в значительной мере влияет на выбор технологий, методов и протоколов связи на различных уровнях многоуровневой архитектуры.

Все сетевые технологии могут быть разделены на две категории: использующие соединения от узла к узлу и сети с применением широкополосного вещания.

В случае соединений точка точка, нет проблем множественного доступа к каналу, не нужны методы синхронизирования и маршрутизации.

В случае широкополосного вещания данных возникает проблема обеспечения эффективного способа одновременного доступа к каналу, максимизирующего коэффициент использования канала и минимизирующего затраты энергии на передачу бита информации в сети. Под коэффициентом использования канала понимается отношение суммарной длительности переданных в сети пакетов к длительности функционирования сети.

### **Особенности организации подводных сетей**

В предыдущем разделе были рассмотрены основные принципы построения наземных сетей. Но применительно к подводной среде, требования и возможности значительно меняются. Многоуровневая архитектура, так удачно применяющаяся при построении наземных сетей, не может так успешно применяться к беспроводной подводной связи.

Учет особенностей подводного канала, таких как экстремально длительная задержка распространения, ограниченность полосы частот и полудуплексная природа средств связи под водой оказывают существенное влияние на протоколы всех уровней и требуют сквозной межуровневой оптимизации для достижения приемлемых значений эффективности сети. Это приводит к взаимозависимой ре-

ализации протоколов различных уровней, что, с учетом отсутствия каких либо стандартов на протоколы связи в мире подводных технологий [1], ограничивает возможности независимой разработки уровней сети, разрушает модульность, а также ограничивает переносимость протоколов в другие условия, нежели те, которые брались во внимание при его создании.

### **Потребление энергии**

Затраты энергии на доставку бита информации в подводной акустической сети являются базовой характеристикой сети, определяющей длительность ее жизненного цикла. Время автономной работы подводных узлов сети составляет от полугода до двух лет, что накладывает существенные дополнительные ограничения на выбор протоколов связи. Избыточность и универсальность протоколов наземных сетей обходится слишком дорого применительно к подводным сетям.

На различных уровнях необходимо предусмотреть режимы пониженного энергопотребления при отсутствии обмена данными между узлами сети. Кроме того, во время ожидания подтверждения или, если применяется механизм передачи на основе окна, не во время действия окна, можно понижать уровень интенсивности передачи и экономить заряд батареи.

### **Производительность**

Несмотря на физические ограничения на скорость передачи данных по акустическому каналу, можно выделить два типа подводных акустических сетей. Первый тип – сети, нечувствительные к задержке доставки данных, второй – сети, чувствительные к задержке данных. К таким сетям относятся сети слежения за сейсмической активностью с целью раннего оповещения цунами и прочие мониторинговые сети раннего оповещения о природных катаклизмах. К таким сетям также можно отнести сети охраны акваторий от вторжения. В этих сетях основной целью является максимально быстрая

передача информации о возникновении некоторого события даже ценой повышенных затрат энергии на доставку данных. При этом часто сообщение, критическое по времени доставки, является широкоэмитальным, поскольку требует оповещение максимального числа узлов о возникновении критического события.

### **Надежность**

Устройства, применяемые под водой, значительно дороже своих наземных аналогов в виду необходимости повышенной защищенности от агрессивной среды, необходимости продолжительной автономной работы. К таким устройствам предъявляются повышенные требования надежности также по той причине, что устранять неполадки под водой крайне сложно, внеплановый же подъем оборудования требует значительных финансовых затрат на организацию экспедиции.

Агрессивная водная среда вынуждает использовать специальные материалы и покрытия, способные сохранить электронику внутри устройства. Необходимость нейтрализации давления на глубине вынуждает использовать соответствующие корпуса.

### **Топологии**

Наиболее практичными с точки зрения организации подводных исследований являются следующие топологии:

1. Двумерное расположение закрепленных на дне водоема сенсоров, которые в горизонтальной плоскости передают всю информацию главному управляющему звену. Последнее же связывается с буюм на поверхности, который передает данные дальше на берег с помощью спутника или через радиоканал.

2. Трехмерное расположение на разной глубине сенсоров, каждый из которых связывается с буюм на поверхности самостоятельно, без промежуточных звеньев. Сенсоры могут быть закреплены на дне или же с помощью буюв на поверхности.

3. Комбинирование предыдущих топологий с использованием автоматиче-

ских передвижных аппаратов.

Ситуативные (*ad hoc*) сети с подвижными узлами являются наиболее востребованными в быстроменяющихся и перестраивающихся в пространстве подводных сетях, однако их сложность на порядок выше статических и их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

### **Транзитная передача данных в беспроводных сетях**

В беспроводных сетях отсутствует гарантия того, что передающую станцию слышат все остальные. Это требует, как минимум, увеличения мощности сигнала, что совершенно недопустимо в подводных сетях. Для организации широкоэмитальной передачи каждый узел сети передает данные только соседям, поэтому до самой отдаленной станции пакет приходит транзитом через несколько узлов, так называемыми скачкам. Проведенные исследования [7, 8] показали, что это позволяет значительно сэкономить энергопотребление несмотря на усложнение маршрутизации.

### **Широкоэмитальные протоколы, ориентированные на пониженное энергопотребление**

В [6] рассматриваются несколько таких протоколов. Прежде чем переходить к их описанию, рассмотрим два простейших, не ориентированных на подводное применение.

#### **SRB**

Простое надежное широкоэмитание (*Simple Reliable Broadcast*). При получении сообщения узел перенаправляет его своим соседям. Если сообщение пришло не полностью, узел ждет некоторое время, а затем запрашивает передачу от соседей повторно. Узел, который получает такой запрос выдерживает случайный промежуток времени и пересылает ответ.

В данном случае повторная пересылка выполняется локально, что не сильно сказывается на производительности всей сети. Делается предположение, что с обработкой коллизий успешно справляется нижний MAC уровень.

Усовершенствовать этот протокол можно применив помехоустойчивое кодирование с возможностью исправления ошибок на стороне получателя. Таким образом снижается вероятность неправильной передачи сообщения и уменьшается количество повторов передач.

Этот протокол не подходит для подводных сетей по той причине, что в канале возникает множество избыточных пакетов, когда у каждого узла несколько соседей, а передача данных в гидроакустическом канале является дорогостоящей.

Следующие протоколы были разработаны специально для подводных сетей.

### **SBRB**

Однополосное надежное ширококешание (*Single-Band Reliable Broadcast*). Этот протокол улучшает *SRB* тем, что, когда узел хочет инициировать ширококешательную передачу, он, в специально выделенной для этого полосе частот с повышенной мощностью сигнала, сообщает об этом всем узлам в сети.

Высокоскоростная передача данных ведется в другой полосе частот с меньшим уровнем излучения сигнала. Если принимающий узел не получил все пакеты сообщения, он обращается к своим соседям аналогично протоколу *SRB*. Если имеются соседи, которые также не получили все пакеты, узел увеличивает мощность сигнала и запрашивает снова, таким образом увеличивая количество опрашиваемых соседей.

Так же как и *SRB* данный рассматриваемый протокол может быть улучшен применением помехоустойчивого кодирования с возможностью исправления ошибок (*FEC*) на стороне получателя.

### **DBRB**

Двуполосное надежное ширококешание (*Dual-Band Reliable Broadcast*). Протокол является усовершенствованием протокола *SBRB*. Его отличие состоит в том, что во время передачи пакета информирующего о начале ширококешательной передачи на большой мощности, также передаются корректирующая часть

передаваемых пакетов с данным, которые применяются получателями для исправления ошибок при получении сообщений. Таким образом, при получении неполного сообщения, многие из узлов могут сами восстановить утерянные пакеты. Вследствие этого предполагается уменьшение количества повторных передач.

Моделирование показывает существенное увеличение эффективности от использования протоколов *SBRB/DBRB* по отношению к *SRB*, однако на практике разделение полосы частот на два диапазона, в которых возможен одновременный прием и передача данных является трудноосуществимой задачей.

### **HARQ**

В [9] для организации ширококешания предложен протокол с использованием гибридных автоматических подтверждений (*Hybrid ARQ*). В отличие от обычного *ARQ*, где вместе с пакетом передается его контрольная сумма, в данном случае пакет передается закодированным для дальнейшего его декодирования с возможностью исправления ошибок.

В качестве алгоритма кодирования были выбраны фонтанные коды из-за их интересных свойств. Во-первых, они легко реализуются с вычислительной точки зрения, а, во-вторых, им не нужно заранее знать вероятность потерь данных в канале. Фонтанные коды [10] основаны на разряженных двудольных графах и являются кодами без фиксированной скорости, что означает, что величина избыточности не привязана жестко к передаче, а может варьироваться на лету до полного восстановления исходных данных. Эти коды показали себя асимптотически почти оптимальными для канала с любой вероятностью искажений.

Для кодирования нужна специальная матрица, состоящая из определенных векторов. В зависимости от этих векторов, изменяется и уровень избыточности, добавляемой к пакету. В [11] было показано, что для больших матриц вычисления результирующих кодов очень простое, однако для подводных сетей, где

ширина полосы ограничена, нужно специально подбирать векторы.

Процесс широковещания в [9] представлен таким образом, что передающий узел разбивает сообщение на пакеты, кодируемые фонтанным кодом, которые в дальнейшем передаются станциям в несколько раундов. После проведения симуляции оказалось, что с увеличением количества узлов, эффективность передачи только увеличивается. После каждого раунда станции-получатели присылают подтверждения. На основе полученных подтверждений передающая станция передает следующий раунд и так пока все получатели не подтвердят, что получили все пакеты, или не будет достигнут определенный лимит раундов.

В [9] не описан механизм приема подтверждений от принимающих станций, ведь делается предположение, что эту часть должен выполнять MAC протокол. Но в подводных сетях нельзя строить сетевые уровни без учета особенностей среды, следовательно на уровне широковещательной передачи также необходимо учитывать особенности реализации MAC протокола. Поэтому предлагается применение двух вариантов.

### **Передача один к одному**

Данная передача реализована способом один к одному, когда передающая станция передает данные принимающей, а также только от нее получает подтверждения. Когда станция хочет начать широковещательную передачу, она борется за доступ к каналу одним из предложенных в [3] методов.

Выбор порядка принимающих станций обусловлен критерием минимизации энергозатрат передающей станции.

Первыми идут станции-соседи. Все остальные станции слушают эфир и получают сообщения от передающей станции. Когда все сообщения удачно переданы текущей станции, передающая переходит к следующей. Новая станция слушала эфир и собрала некоторый процент сообщений, которых, однако, недостаточно для декодирования. Передающая станция

передает недостающие пакеты и, таким образом, все сообщения доходят до приемной станции. Могут быть случаи, когда принимающая станция получила все сообщения только лишь при прослушивании эфира и подтверждает это передающей станции. В данном случае идет обмен лишь подтверждениями.

Передача между станциями ведется с помощью фонтанных кодов, что снижает количество повторных передач благодаря способности кодов исправлять ошибки. Станции образуют нетранзитную сеть.

Недостатком такого метода является повышенное энергопотребление передающей станции, которая вынуждена связываться даже с самыми удаленными узлами. Однако из-за особенностей алгоритма, многие станции уже будут иметь достаточное количество информации для декодирования переданных сообщений и время передачи будет существенно уменьшено.

### **Разделение во времени**

Рассмотрим прием передающей станции подтверждений от приемников при разделении во времени ожидания приема. Данный способ исключает коллизии, так как для каждой станции выделен временной промежуток, на протяжении которого передающая станция принимает от них подтверждения. Синхронизация часов станций осуществляется перед установкой сенсоров под воду.

Временной промежуток должен учитывать двойное время максимального распространения сигнала от самой удаленной станции.

При передаче пакета, в его заголовок помещается локальное время передающей станции, что используется принимающими для определения времени распространения сигнала, ведь часы у всех сенсоров синхронизированы. Таким образом, станция может вычислить нужный ей временной промежуток.

Очевидно, что с ростом количества станций, пропускная способность канала существенно падает, однако для неболь-

шого количества сенсоров, которое применяется на практике, этого может оказаться вполне достаточно.

### **Моделирование**

Моделирование сетей является важным элементом успешности внедрения экспериментальных разработок, апробирования новых протоколов или модификаций уже существующих.

По сравнению с программным обеспечением для моделирования наземных радио или проводных сетей, моделирование подводного акустического канала не так распространено. Но такое моделирование является очень важным и выгодным способом разработки и тестирования. Ведь реальные исследования сопряжены со значительными материальными вложениями и временными ресурсами.

Однако, большинство современного программного обеспечения не учитывает особенностей подводных акустических каналов и не позволяет создавать собственные физические или каналные условия. Поэтому лучшим является вариант, который можно дорабатывать и изменять самостоятельно. Этой возможностью обладает свободно-распространяемый эмулятор сети *ns2* [12]. К его преимуществам также можно добавить большое сообщество исследователей и распространенность в университетской среде.

Среди дополнительных возможностей *ns2* можно выделить следующие:

1. Обеспечение сильной математической поддержки, что позволяет создавать различные виды трафика от простейшего, подчиняющегося пуассоновскому закону, и заканчивая самоподобным. Собственные математические функции могут быть легко реализованы благодаря гибкой архитектуре *ns2*.

2. Моделирование ошибок, что позволяет моделировать ошибки на физическом или канальном уровнях, реализовывать патерю пакетов, а также писать свои модули.

3. Визуализация анимации результатов моделирования: отображение топологии сети, анимация пакетов, узлов, оче-

редей, и различные возможности анализа данных.

4. Мультиоперационность. Дистрибутивы *ns2* доступны для многих современных операционных систем.

5. Объекто-ориентированность. Ядро реализовано на языке *C++*, а скрипты пишутся на *OTcl*.

Для *ns2* существует разработанная библиотека для моделирования особенностей подводных сетей и управления сквозными протоколами для принятия во внимание особенностей среды [13], которую можно использовать как базу для проведения собственных исследований.

### **Выводы**

В статье рассмотрены основные отличительные свойства подводных акустических каналов связи. Основными преградами при проектировании сетей в таких каналах являются: ограниченная полоса пропускания; большая зависимость от энергопотребления; свойства среды, к которым относятся большие задержки распространения, затухание сигнала и многолучевость. Необходимо принимать во внимание, что многоуровневая организация, принятая в наземных сетях, не подходит для подводной связи, здесь необходимо учитывать свойства среды, обеспечивать сквозное межуровневое управление и межуровневую оптимизацию.

К подводным акустическим сенсорным сетям выдвигаются такие требования: надежность, низкое энергопотребление, производительность. Все это обусловлено спецификой применения подводной связи, стоимостью и доступностью устройств передачи данных.

В качестве практических рассмотрены несколько топологий. В качестве примера приведена топология вида «звезда» со статичными станциями.

Рассмотрены несколько современных протоколов широкополосной связи, среди которых *SBRB*, *FSBRB*, *DBRB* и *HARQ* с применением многообещающих фонтанных кодов. Также представлены детали реализации приема поддерживающих со-

общение при организации широкополосного: «один к одному» и «с временным разделением», рассмотрены их особенности, достоинства и недостатки.

В качестве средства моделирования может быть использовано программное обеспечение ns2. Его особенностями является свобода и бесплатность, развитость сообщества исследователей и распространенность в университетской среде, что позволяет разрабатывать не только собственные улучшения и дополнения, но и свободно пользоваться многими уже готовыми. Существуют конфигурации специально предназначенные для подводных акустических каналов.

Подводные акустические сети – это молодое и быстроразвивающееся поле для исследований. Широкополосные сети только начинают разрабатываться. Особенности канала и необходимость новых протоколов различных уровней открывают большие возможности для дальнейших исследований.

### **Список литературы**

1. *P. Casari, A.F. Harris.* Energy-efficient Reliable Broadcast in Underwater Acoustic Networks, International Conference on Mobile Computing and Networking, Proceedings of the second workshop on Underwater networks, Montreal, Quebec, Canada, 2007, – P. 49–56.
2. *P. Casari and M. Rossi and M. Zorzi.* Towards Optimal Broadcasting Policies for HARQ based on Fountain Codes in Underwater Networks, in Proc. IEEE/IFIP WONS, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Jan. 2008, – P. 11–19.
3. *Chitre, M. Shahabudeen, S., Stojanovic M.* Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges. Marine technology society journal, 2008, Vol 42; Numb 1, – P. 103–116.
4. *Dario Pompili.* Efficient Communication Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks, University of Delaware, Newark, DE, February 13, 2008.
5. *G Legg, S. A., P Irie, R., and Lavigne A.* A Study of Ambient Noise in Shallow Water, Florida Atlantic University Technical Report, 2000.
6. *A. Tannenbaum.* Computer Networks, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
7. *Harris, A.F. and M. Zorzi.* On the Design of Energy-efficient Routing Protocols in Underwater Networks, 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'07), 2007, – P. 80–90.
8. *Domingo M.C., Prior R.* Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks, Computer Communications, vol. 31, Issue 6, 2008, – P. 1227–1238.
9. *D.J. C. MacKay.* Fountain Codes. IEE Proceedings Communications, vol. 152, no. 6, 2005, – P. 1062–1068.
10. *M. Luby.* LT Codes in The 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Vancouver, B.C., Canada, Nov, 2002, – P. 271–280.
11. *Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic, and John G. Proakis.* Underwater Acoustic Networks, IEEE journal of oceanic engineering, vol. 25, no. 1, 2000, – P. 72–83.
12. *Кучерявый Е.А.* NS2 как универсальное средство имитационного моделирования сетей связи, Tampere University of Technology, Telecommunications Laboratory, Tampere, Finland, 2001.
13. <http://www.dei.unipd.it/wdyn/?IDsezione=3965>