

Протокол динамической маршрутизации для сети автономных донных гидроакустических станций

О. Ю. Кочетов^{1,*}, В. Г. Петников^{2,†}, А. В. Шатравин^{1,‡}

¹Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Россия,
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

²Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38
(Статья поступила 07.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Рассмотрены особенности применения протоколов динамической маршрутизации для построения самоорганизующейся сети автономных донных гидроакустических станций с использованием звукоподводной связи. Дан обзор известных протоколов динамической маршрутизации для мобильных радиосетей, показаны преимущества и недостатки проактивного и реактивного подходов. Описаны модификации реактивного протокола динамической маршрутизации AODV, учитывающие особенности использования звукоподводной связи. Этот протокол рекомендован для звукоподводной связи на Арктическом шельфе.

PACS: 43.60.Dh.

УДК: 004.724.3.

Ключевые слова: динамическая маршрутизация, звукоподводная связь.

ВВЕДЕНИЕ

Задача гидроакустического мониторинга с оперативной обработкой полученных данных выдвигает ряд противоречивых требований к техническим методам и используемой аппаратуре. Так, например, при проведении природоохранного мониторинга уровня шума во время строительных работ на морском шельфе или для регистрирования наличия морских млекопитающих в заданном районе необходимо использовать значительное количество гидроакустических станций, речь может идти о десятке и более единиц. При этом каждая станция должна оперативно передавать свои результаты измерений системе, осуществляющей агрегацию, хранение, обработку и визуализацию полученных данных. Обычно такая система представляет собой удалённую вычислительную платформу, связанную с аппаратурой мониторинга каналом беспроводной связи с помощью радио или спутниковых средств.

Оснащать каждую гидроакустическую станцию собственным терминалом связи нецелесообразно по причинам высокой стоимости и значительного энергопотребления радиооборудования. Второй и, пожалуй, более значимой причиной отказаться от использования на каждой станции индивидуальных терминалов радиосвязи является необходимость размещения приёмопередающих антенн над водой, в поверхностном буе, что невозможно, например, на Арктическом шельфе в акваториях, покрытых льдом.

Это приводит к решению использовать для передачи данных «на берег» минимальное число выделенных узлов, оснащённых терминалами радио или спутниковой связи, а для сбора результатов измерений с под-

водных гидроакустических станций применить метод звукоподводной связи.

1. АРХИТЕКТУРА И ТОПОЛОГИЯ СЕТИ

В самом простейшем случае сеть подводных акустических станций может быть построена с топологией типа «звезда», когда каждая периферийная станция имеет возможность передавать данные центральному узлу напрямую. Однако это частный случай, применимый только для небольших по площади зон мониторинга. В более общем случае придётся прибегнуть к передаче данных от станции к станции в сторону центрального узла, для этого каждый узел сети должен обладать функцией ретранслятора. В таком случае наиболее перспективным с точки зрения общей надёжности системы представляется вариант, когда все участвующие в обмене данными станции находятся в одном ранге, то есть являются полностью взаимозаменяемыми. Схематический пример топологии подобной сети гидроакустических станций приведён на рис. 1.

К настоящему времени появился ряд технологий, применяемых для построения радиосетей похожей топологии, таких как ZigBee [1] и SmartMesh [2]. Эти технические решения основываются на протоколах динамической маршрутизации, то есть автоматического построения и оптимизации маршрутов в сети. Основные преимущества использования подобного протокола заключаются в возможности построения сетей произвольной конфигурации, как по количеству узлов, так и по расположению их в пространстве, гибкой модификации сети путём добавления или перемещения узлов и повышения надёжности всей системы, когда в случае выхода из строя или отключения одного узла сеть способна автоматически построить новые маршруты передачи данных в обход отключившегося узла.

Подобный метод организации сети передачи данных может быть применён и для сети гидроакустических

*E-mail: ok@noiselab.ru

†E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

‡E-mail: ashatrav@ocean.ru

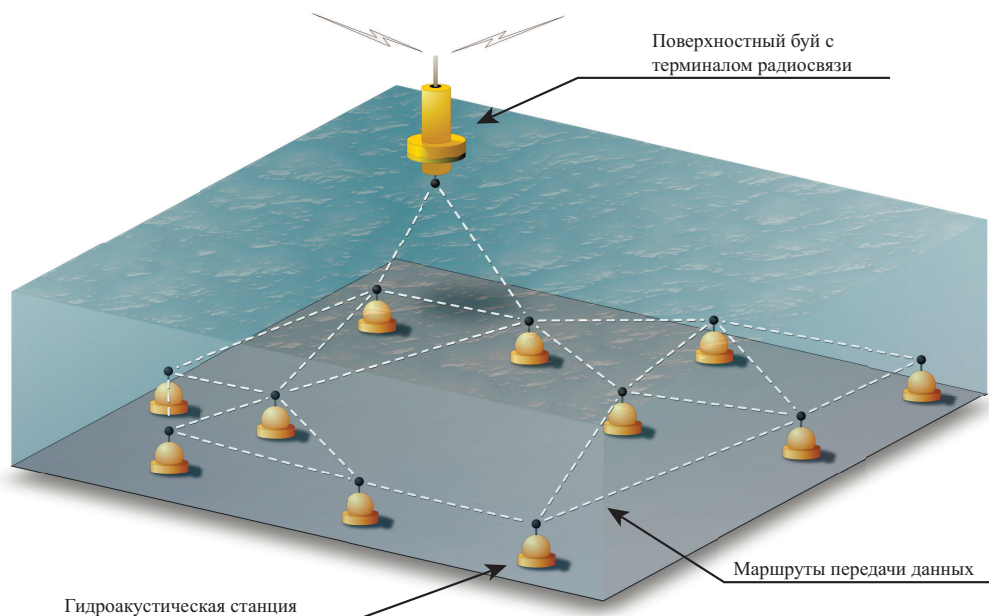


Рис. 1: Схема возможной топологии сети гидроакустических станций

станций, использующих звукоподводную связь. Однако в отличие от радиосвязи, звукоподводная связь имеет ряд существенных ограничений, обусловленных условиями распространения акустических сигналов в воде, такими как: низкая скорость и многолучевое распространение сигнала, длительное время реверберации, ограниченность частотной полосы сигнала и расстояния его распространения.

Для того чтобы создать в таких условиях эффективный канал передачи цифровой информации, на уровне физической среды (если рассматривать первые три уровня стандартной сетевой модели OSI) применяются особые способы модуляции/демодуляции данных [3, 4]. На канальном уровне для борьбы с коллизиями, то есть одновременной передачей сигналов несколькими узлами применяются специальные протоколы канального уровня, такие как FAMA-CF [5], MACAW [6], TDMA, CDMA и другие [7].

На сетевом уровне применяются протоколы динамической маршрутизации, из которых можно условно выделить два класса по принципу функционирования: проактивные (например: OLSR [8], DSDV [9]) и реактивные (например: AODV [10], DSR [11]). Главное их отличие заключается в том, что при использовании проактивного алгоритма строится глобальная таблица маршрутизации, которая распространяется по всем узлам сети и периодически обновляется, реактивные же алгоритмы позволяют выстраивать маршруты по требованию, в результате чего каждый узел сети хранит только актуальные для него маршруты, в которых он участвует. Оба подхода обладают своими преимуществами и недостатками.

2. ПРОАКТИВНЫЕ ПРОТОКОЛЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

Как уже было сказано выше, при использовании проактивного протокола динамической маршрутизации каждый узел сети содержит информацию о маршрутах до каждого другого узла в сети. Для поддержания этой информации в актуальном состоянии в сети периодически запускается процесс обновления таблиц маршрутизации, в ходе которого фиксируются изменения в топологии сети. Различия между проактивными протоколами заключаются в основном в характере хранения данных о маршрутах и в том, как эти данные организованы в таблицы маршрутизации.

Протокол OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR является развитием традиционного алгоритма маршрутизации для кабельных сетей, основанном на определении связей между узлами. Для обновления информации о топологии сети этот алгоритм использует периодический обмен служебными сообщениями, содержащими перечень имеющихся связей. Преимущество OLSR относительно базового алгоритма состоит в использовании стратегии многоточечного повторения (MPR, MultiPoint Relaying) для минимизации длины служебных сообщений и количества их ретрансляций.

Идея этой стратегии состоит в том, что для каждого служебного сообщения узел определяет набор соседних узлов, имеющих право его ретранслировать. Каждый узел сети, который сможет принять это сообщение, может использовать его для обновления таблиц маршрутизации, но ретранслировать дальше могут только узлы из заданного набора.

Набор узлов-ретрансляторов выбирается из списка ближайших соседей (с метрикой, то есть числом пе-

реходов, равной единице), таким образом, чтобы объединённое множество их ближайших соседей содержало всё множество соседей исходного узла с метрикой равной двум. Рис. 2 демонстрирует пример топологии узлов, при которой узел А исключит узлы С, Е и G из списка узлов–ретрансляторов, поскольку все их связи дублируются другими узлами.

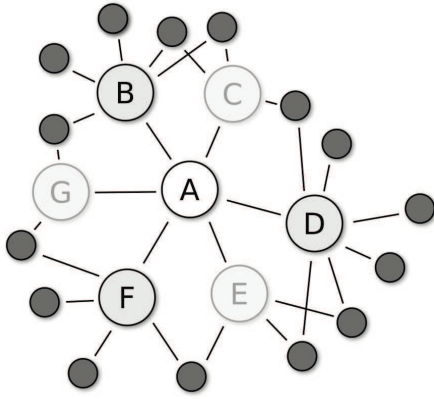


Рис. 2: Пример стратегии MPR для протокола OLSR: узел А исключает узлы С, Е и G из списка узлов–ретрансляторов, поскольку все их связи дублируются другими узлами

Благодаря стратегии MPR каждый узел сети определяет оптимальные по количеству переходов маршруты и сохраняет их в своей таблице маршрутизации. Таким образом, на каждом узле в любой момент времени работы имеется информация о маршрутах до каждого узла сети.

Протокол DSDV (Destination–Sequenced Distance Vector)

Алгоритм протокола DSDV, будучи модификацией классического алгоритма дистанционно-векторной маршрутизации DBF (Distributed Bellman–Ford) [12], гарантирует отсутствие образования маршрутных петель.

Для поддержания целостности глобальной таблицы маршрутизации используется метод последовательной нумерации для каждой записи. Номера присваиваются маршрутам узлами–адресатами во время процедуры нахождения маршрута и увеличиваются последовательно с каждым изменением маршрута. Это позволяет поддерживать актуальность таблицы маршрутизации на всех узлах сети.

Для обновления данных каждый узел сети периодически отправляет широковещательные сообщения двух типов: «полный дамп» то есть сообщение, содержащее полную таблицу маршрутизации узла и добавочные «инкрементальные» сообщения, в которых отражаются последовательные изменения в маршрутах, произошедшие со времени последнего «полного дампа». Такие сообщения имеют меньший размер и отправляются чаще, этот подход позволяет снизить нагрузку на сеть потоком служебных сообщений. Однако, с ростом

количества узлов (N) эта нагрузка растёт по закону $O(2N)$ [14], что не позволяет масштабировать протокол DSDV для применения в крупных сетях, поскольку значительная часть пропускной способности сети будет использована только для служебных сообщений.

3. РЕАКТИВНЫЕ ПРОТОКОЛЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

В отличие от проактивных протоколов, реактивные протоколы динамической маршрутизации не используют регулярных процессов обновления данных о топологии сети. Вместо этого процесс поиска маршрута до конкретного адресата запускается по требованию, то есть непосредственно перед передачей данных от узла-источника узлу–приёмнику и только в том случае, если сведения о таком маршруте отсутствуют либо устарели.

Процесс поиска пути обычно выполняется методом лавинной рассылки сообщения о запросе маршрута. Когда это сообщение получает узел, обладающий маршрутом до требуемого адресата, он отправляет ответное сообщение, содержащее информацию о маршруте используя тот же путь, по которому пришёл запрос (это возможно в случае двусторонних каналов передачи данных), либо также используя лавинную рассылку. Таким образом, с ростом числа узлов (N) нагрузка служебными сообщениями поиска пути на пропускную способность сети будет расти в самом худшем сценарии как $O(N+M)$ для случая двусторонних каналов связи, где M — количество узлов в обратном маршруте и $O(2N)$ для случая односторонних каналов связи.

При отправке сообщений в реактивных протоколах динамической маршрутизации применяется два подхода для адресации: маршрут либо полностью задаётся узлом–источником и включается в заголовок сообщения (т.н. source routing) либо источник указывает только номера узла–адресата и следующего узла–ретранслятора (hop–to–hop routing). В первом случае сообщение просто передаётся узлами в соответствии с заданным маршрутом, во втором случае каждый промежуточный узел принимает решение о том, какому следующему узлу–ретранслятору следует передать сообщение. Преимущество первого метода в том, что промежуточным узлам не требуется поддерживать актуальную информацию о каждом активном маршруте, недостатком является плохая масштабируемость в случае роста сети, т.к. длина маршрутов будет возрастать, что приведёт к росту объёма данных, включаемых в заголовок сообщения. Дополнительно, с увеличением длины путей возрастает вероятность недоставки сообщения в случае потери связи одним из узлов маршрута.

Второй метод лишён этих недостатков, но для его применения каждый узел должен хранить информацию о всех активных маршрутах и использовать так называемые «маячковые» (beaconing) широковещательные

сообщения для поддержания актуальной информации о своих ближайших соседях.

Протокол DSR (Dynamic Source Routing)

Этот протокол использует передачу полного маршрута при отправке сообщений, поэтому не может эффективно применяться в сетях с большим числом узлов или с динамично изменяющейся топологией. Однако в небольших сетях, состоящих из стационарных узлов этот протокол может быть весьма эффективен. Основным его преимуществом является то, что узлы сети могут сохранять несколько альтернативных маршрутов для каждого адресата. Это позволяет эффективно использовать кэширование информации о маршрутах и в случае наличия сохранённого ранее актуального пути обходиться без процедуры поиска нового.

Вторым преимуществом протокола DSR является отсутствие необходимости в регулярных «маячковых» широковещательных запросах, что, во-первых, уменьшает служебную нагрузку на сеть, во-вторых позволяет узлам сети дольше находиться в режиме «сна», то есть пониженного потребления энергии, что увеличивает срок автономности каждого узла.

Протокол AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)

AODV основан на методах протоколов DSDV и DSR. Он использует процедуры протокола DSDV для единой нумерации маршрутов и алгоритм протокола DSR для определения самих маршрутов.

Алгоритм действует следующим образом: каждый узел адресуется собственным уникальным в пределах сети идентификатором (ID). Обнаружение маршрута начинается с того, что узел-источник, отправляет широковещательный запрос маршрута (RRQ, route request) с идентификатором узла назначения. Все узлы, которые смогли принять этот запрос, запоминают ID назначения и ID отправителя, создавая таким образом запись обратного маршрута до узла-источника, отправившего RRQ. Затем, каждый из этих узлов ретранслирует запрос RRQ дальше, либо отправляет ответ (RRP, route reply) если он уже обладает актуальной информацией о требуемом маршруте. RRP отправляется тому узлу, который послал RRQ, для этого используется уже имеющаяся запись об обратном маршруте. Таким образом устанавливается двусторонний маршрут до узла назначения, при этом каждый из промежуточных узлов хранит только ID узла назначения и ID следующего узла в пути. Для предотвращения образования петель и явления «широковещательного шторма», а также для помощи в выборе оптимального маршрута при наличии нескольких вариантов, в пакеты RRQ и RRP встраивается информация об ID источника и назначения, последовательный номер посылки и метрика качества связи. В качестве такой метрики может использоваться, например, уровень принимаемого сигнала или количество ошибок за определённый период времени. В случае обнаружения невозможности построения маршрута или изменения уже существую-

щего маршрута узел отправляет в ответ сообщение об ошибке RERR (route error).

Отличительной особенностью протокола AODV является то, что пакеты данных не несут полной информации о маршруте до узла назначения, то есть применяется маршрутизация hop-to-hop. Это позволяет снизить нагрузку на сеть служебными данными, несмотря даже на необходимость использования регулярных «маячковых» широковещательных сообщений.

К недостаткам протокола AODV можно отнести длительность процедуры поиска пути, как первоначально, так и повторного, в случае потери связи между отдельными узлами.

4. ПРОЧИЕ ПРОТОКОЛЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

Кроме описанных выше четырёх протоколов динамической маршрутизации существуют и другие. Например, протокол использующий для выбора наиболее выгодного маршрута алгоритм колонии муравьёв (ARA, Ant-colony-based Routing Algorithm): каждый проходящий через узел пакет данных, оставляет так называемую «феромонную метку», помечая таким образом свой путь, как это делают в природе муравьи. Метка по сути является таймером с обратным отсчётом и чем ближе время обнуления метки, тем менее она «привлекательна» для следующих тем же маршрутом пакетов данных. Маршруты, через которые успешно проходит большее количество пакетов помечаются большим количеством свежих меток и становятся предпочтительными для прохождения следующих порций данных.

Однако преимущества такого алгоритма раскрываются только при использовании в сети с очень большим количеством узлов (а, следовательно, и большим количеством альтернативных маршрутов), способных передавать большие объёмы данных на высокой скорости, что присуще, например, сетям мобильной связи. В сети гидроакустической связи подобный алгоритм будет заведомо малоэффективен.

Прочие протоколы также ориентированы на особенности наземных беспроводных сетей, например LAR (Location Aided Routing) предполагает использование датчиков GPS для определения географических координат узлов, что разумеется не может быть применено для подводных условий.

5. ПРИМЕНИМОСТЬ ДЛЯ СЕТИ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ

Как уже было показано выше, в отличие от использующих радиосигналы наземных беспроводных сетей передачи данных, сети акустической подводной связи обладают рядом существенных ограничений. В первую

очередь это низкая скорость передачи данных, в лучшем случае десятки килобит в секунду и длительные временные задержки на прохождение сигнала, обусловленные скоростью звука в воде ~ 1500 м/с.

Кроме того, важным отличием сети ЗПС является её статичность, поскольку в большинстве случаев узлы сети зафиксированы в пространстве и рассчитаны на длительную непрерывную работу, обычно в течение всего времени эксплуатации сети. Эти особенности определяют характер требований к протоколу динамической маршрутизации, который можно применить для сети ЗПС: минимизация загрузки канала передачи служебным трафиком и минимизация длины передаваемых сообщений.

Класс проактивных протоколов, требует регулярного обновления глобальной в рамках сети таблицы маршрутизации, что создаёт постоянную загрузку канала передачи данных служебными сообщениями и эта загрузка тем больше, чем больше узлов содержит сеть. Поэтому применение проактивного протокола вроде рассмотренных выше OLSR и DSDV не представляется перспективным.

Реактивные протоколы гораздо лучше соответствуют указанным требованиям, поскольку служебная загрузка сети возникает только при необходимости установить новый маршрут, а накопленные сведения о маршрутах долго не теряют актуальности в силу статичности узлов сети. Требование к минимизации размера сообщения делает необходимым использование hop-to-hop маршрутизации, что приводит в итоге к выбору протокола AODV, как наиболее соответствующего всем требованиям.

Существует облегчённая модификация протокола AODV, называемая AODVjg [13], в которой упрощена процедура поиска пути, что позволяет при сохранении всех основных преимуществ дополнительно сократить нагрузку на сеть служебными данными, в частности вовсе отказаться от регулярных маячковых сообщений. Кроме того, реализация этого протокола также получается значительно проще, что позволяет сокра-

тить срок разработки устройств и минимизировать вероятность возникновения ошибок в программном обеспечении, реализующем этот протокол.

Поскольку нагрузка на сеть служебными сообщениями при использовании протокола AODVjg невелика, т.к. возникает только во время поиска маршрута и в случае изменения топологии сети, то общая производительность (т.е. объём данных передаваемый на центральный узел в единицу времени) сети, использующей протокол AODVjg, будет зависеть в основном только от пропускной способности канала данных и эффективности используемого протокола канального уровня, обеспечивающего передачу данных несколькими соседними узлами без коллизий. Эта особенность делает протокол AODVjg перспективным для использования в сложных условиях, когда пропускная способность канала сильно ограничена. Для оценки производительности сети типовой топологии с несколькими постоянно передающими узлами необходимо моделирование взаимодействия всех узлов сети, что выходит за рамки настоящей работы и является предметом последующего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор технических проблем, возникающих при создании распределённых гидроакустических систем, использующих звукоподводную связь для передачи данных. Рассмотрены описанные в литературе решения для построения наземных радиосетей, использующих протоколы динамической маршрутизации для передачи данных между узлами. Представлены описания протоколов динамической маршрутизации, имеющих перспективы использования в сетях ЗПС. Предложено использование облегчённого протокола AODVjg для применения в сложных, в том числе арктических условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-02036).

- [1] Baronti P., Pillai P., Chook V., Chessa S., Gotta A., Fun Hu Y. Computer communications. 2007. **30**, N7. P. 1655.
- [2] Watteyne T., Doherty L., Simon J. Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2013 Seventh International Conference on 3 Jul. 2013. P. 547.
- [3] Безответных В. В., Буренин А. В., Каменев С. И., Моргунов Ю. Н. Подводные исследования и робототехника. 2014. **18**, № 2. С. 58.
- [4] Курьянов Б. Ф., Пенкин М. М. Акуст. журн. 2010. **56**, № 2. С. 245.
- [5] Kebkal A., Kebkal K., Komar M. Europe Oceans. 2005. **2**. P. 1174.
- [6] Bharghavan V., Demers A., Shenker S., Zhang L. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1994. **24**. N4. P. 212.
- [7] Morns I. P., Hinton O. R., Adams A. E., Sharif B. S.

- OCEANS. 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. 2001. **4**. P. 2076.
- [8] Clausen T., Jacquet P. RFC. 2003. 3626.
- [9] Perkins C. E., Bhagwat P. ACM SIGCOMM computer communication review. 1994. **24**, N4. P. 234.
- [10] Perkins C., Belding-Royer E., Das S. RFC. 2003. 3561.
- [11] Johnson D. B., Maltz D. A., Broch J. Ad hoc networking. 2006. P. 139.
- [12] Bertsekas D. P., Gallager R. G. New Jersey : Prentice-Hall Inc. 1987. P. 297.
- [13] Chakeres I. D., Klein-Berndt L. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. 2002. **6**, N3. P. 100.
- [14] То есть пропорционально удвоенному количеству всех узлов сети.

Dynamic routing protocol for autonomous underwater hydroacoustic buoy networks

O. J. Kochetov^{1,a}, V. G. Petnikov^{2,b}, A. V. Shatravin^{1,c}

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS. Moscow 117997, Russia*

²*A.M. Prokhorov General Physics Institute of RAS. Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aok@noiselab.ru, ^bpetniko@kapella.gpi.ru, ^cashatravin@ocean.ru

The peculiarities of the application of dynamic routing protocols for the design of a self-organizing network of autonomous underwater hydroacoustic buoys with underwater acoustic communication are discussed. A review of known dynamic routing protocols for mobile radio networks is presented, the advantages and disadvantages of proactive and reactive approaches are shown. Modifications of the AODV dynamic routing protocol for applying to underwater acoustic communication are proposed for Arctic shelf.

PACS: 43.60.Dh.

Keywords: dynamic routing, underwater acoustic communication.

Received 07 July 2017

Сведения об авторах

1. Кочетов Олег Юрьевич — гл. специалист; e-mail: ok@noiselab.ru.
2. Петников Валерий Георгиевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 503-83-84, e-mail: petniko@kapella.gpi.ru.
3. Шатравин Александр Владимирович — мл. науч. сотрудник; e-mail: ashatravin@ocean.ru.