

УДК 004.057.4

ББК 32.97

МАРШРУТИЗАЦИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ.

Ефремов А.Ю.¹, Легович Ю.С.², Максимов Д.Ю.³

(Учреждение Российской академии наук

Институт проблем управления РАН, Москва)

В статье представлен протокол маршрутизации в беспроводных сетях передачи данных с подвижными объектами. При коммутации используется метод определения кратчайшего пути в графе, основанный на распространении автоволн в нейронных сетях. Протокол основан на организации виртуального канала, при котором информация о канале хранится в передаваемом пакете. Данный подход позволяет работать в условиях динамически изменяемой обстановки и снизить требования к оборудованию за счет отказа от использования таблиц маршрутизации.

Ключевые слова: автоволны в нейронных сетях, Mesh – сети, беспроводные сети, протоколы маршрутизации.

1. Введение

Одним из самых перспективных направлений развития технологии беспроводной передачи данных стали mesh-сети, описываемые в стандарте IEEE 802.11s, который находится в стадии

¹ Андрей Юрьевич Ефремов, ст. науч. сотр. (andre@ipu.ru).

² Юрий Сергеевич Легович, кандидат технических наук, зав. лаб. (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-93-61).

³ Дмитрий Юрьевич Максимов, науч. сотр. (phoenixjhanjaa@ya.ru).

разработки. Несмотря на отсутствие официально принятого стандарта (черновой вариант стандарта IEEE P802.11s/D2.0 ([4]) был представлен в апреле 2008 года) производителями оборудования был выпущен ряд устройств, на основе которых уже были успешно построены первые, достаточно крупные mesh-сети.

Отметим некоторые особенности mesh-сетей. Mesh – сетевая топология, в которой устройства объединяются многочисленными (часто избыточными) соединениями. Топология Mesh основана на децентрализованной схеме организации сети, что дает высокую степень надежности. Сеть можно представить в виде узлов, которые не только предоставляют возможность подключения, но и выполняют функции маршрутизаторов/ретрансляторов. Кроме того, некоторые узлы могут выполнять функции шлюза во внешнюю сеть.

Учитывая особенности построения mesh-сетей, одним из важнейших вопросов является выбор протоколов маршрутизации, что нашло свое отражение в стандарте 802.11s. В данном стандарте заложен обязательный для реализации метод маршрутизации, который использует протокол HWMP и метрику времени передачи.

Гибридный протокол маршрутизации HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) использует стандартный набор служебных пакетов, правил их создания и обработки. Он объединяет в себе два режима построения путей, которые могут быть использованы как по отдельности, так и одновременно в одной сети ([1]):

- реактивный режим – построение маршрутных таблиц в узлах mesh-сети непосредственно перед передачей данных (по запросу);
- проактивный режим – регулярная процедура обновления информации в маршрутных таблицах узлов всей сети. Процедуру инициирует корневой узел, в результате на сети строится граф (дерево) путей с вершиной в корневом узле.

В реактивном режиме узел-источник отправляет широко-вещательный RREQ-пакет запроса пути. Узел-адресат отправляет инициатору пакет подтверждения RREP. В проактивном режиме происходит регулярное обновление таблиц маршрутизации на основании широковещательного RREQ-пакета, который периодически рассылается корневым узлом. Для сокращения широковещательного трафика устанавливается время жизни пакета, которое определяется как число узлов, которые он может пройти. Также используются специальные механизмы для ограничения циклических маршрутов (например, используется порядковый номер запроса).

Таким образом, можно отметить, что протокол HWMP основан на использовании таблиц маршрутизации в каждом узле mesh-сети, которые строятся на основании широковещательных RREQ-пакетов. Заметим также, что протоколы маршрутизации, реализованные разработчиками оборудования, также основаны на использовании таблиц маршрутизации и не сильно отличаются от HWMP.

Использование таблиц маршрутизации предъявляет достаточно высокие требования к оборудованию. В то же время, в сетях передачи данных с подвижными объектами, частным случаем которых являются Mesh-сети, желательно использовать «легкое» оборудование с минимальными требованиями к памяти и процессору. В данной работе предлагается отказаться от таблиц маршрутизации, сократить широковещательный трафик и использовать для организации маршрутов нейросетевой метод определения кратчайшего пути в графе ([6]), а информацию о маршруте записывать непосредственно в передаваемый пакет, по аналогии с «червячной» маршрутизацией в SpaceWire ([5]). Фактически речь идет о построении виртуального канала в таких сетях, информация о котором содержится в передаваемом пакете.

Во втором разделе описаны основные идеи, лежащие в основе предлагаемого метода маршрутизации, а в третьем – новый протокол.

2. Основные идеи, лежащие в основе предлагаемого метода маршрутизации

2.1. ВОЛНЫ В СЕТЯХ

Поиск оптимального маршрута в Mesh-сетях основан на минимизации различных параметров, но общим требованием ко всем вариантам протокола является поддержка поиска пути на основе минимизации времени передачи сообщения.

В [6] был предложен метод нахождения кратчайшего пути в графе для варианта импульсной связной нейронной сети (output-threshold coupled neural network). Метод моделирует распространение волнового фронта: сигнал испускается нейроном-источником по всем направлениям. Каждый нейрон принимает первый, пришедший к нему, сигнал и опять рассылает его по всем направлениям и больше на сигналы не реагирует. Таким образом, сигнал распространяется до всех конечных нейронов по путям минимального времени. При этом отсутствуют петли – так как волновой фронт не распространяется в обратном направлении.

2.2. «ЧЕРВЯЧНАЯ» МАРШРУТИЗАЦИЯ В ПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Этот метод маршрутизации ([3, 5]) используется в сетях SpaceWire и относится к методам коммутации «на лету».

При поступлении заголовка пакета во входной порт маршрутизатора сразу выбирается выходной порт и начинается сквозная передача информации без промежуточной буферизации и хранения в маршрутизаторе, что обеспечивает малые задержки прохождения пакета через маршрутизатор и существенно снижает аппаратные затраты и энергопотребление.

Существует несколько способов адресации узла назначения, но нас здесь интересует только так называемая **путевая адресация**. В этом случае путь к узлу назначения задается в виде последовательности номеров выходных портов маршрутизаторов, через которые должен пройти пакет, с заданной последователь-

ностью в заголовке. Маршрутизатор считывает первый символ последовательности из заголовка, который является номером его выходного порта, стирает символ и пересылает пакет на нужный порт. Следующий маршрутизатор имеет дело уже со следующим символом последовательности и т.д.

2.3. «ЧЕРВЯЧНАЯ» МАРШРУТИЗАЦИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

В беспроводных сетях можно использовать аналогичный подход к реализации метода «червячной» маршрутизации, несмотря на достаточно серьезное различие в реализации физического уровня в проводных и беспроводных сетях.

Роль портов маршрутизатора в беспроводных сетях выполняют соседние узлы. Для этого, в каждом узле создается таблица соседей, включающая MAC-адрес соседнего узла и его номер, являющийся, по сути, номером порта.

Таким образом, каждый узел становится маршрутизатором с переменным количеством портов.

Далее в статье мы будем использовать термин *номер порта*, подразумевая под ним просто номер, присвоенный соседнему узлу в таблице соседей текущего узла сети.

Как и в проводной сети, маршрут задается последовательностью номеров портов, которая записывается непосредственно в пакет.

2.4. ПОИСК МАРШРУТА

Предлагаемый алгоритм маршрутизации, как и протокол HWMP, основан на использовании служебных пакетов при коммутации. Как и в реактивном режиме HWMP узел-источник отправляет широковещательный пакет запроса пути. Узел-адресат отправляет инициатору пакет подтверждения. Различие между протоколами состоит в том, что в предлагаемом способе поиска пути пакет подтверждения, полученный узлом-источником, содержит требуемый маршрут (последовательность

номеров портов), что делает ненужным использование таблиц маршрутизации.

При коммутации используется алгоритм защиты от петель и сокращения широковещательного трафика, реализующий распространение волнового фронта и более подробно описанный в следующем разделе.

3. Схема протокола

Как уже указывалось выше, каждый узел сети содержит таблицу соседей. Максимальное число соседей предлагается задать равным 255 для того, чтобы в адресной последовательности на каждый узел приходился один байт. Номера портов задаются в диапазоне от 1 до 255, ноль резервируется для служебных целей. Для сетей с подвижными объектами такое ограничение не является очень сильным. Такая таблица невелика и не требует больших ресурсов.

Записи в таблице соседей обновляются при возникновении связи с новым узлом или при разрыве связи с каким-либо из существующих узлов. Влияние обновления таблицы соседей на работу протокола является существенным и будет обсуждено ниже.

3.1. КОММУТАЦИЯ

При коммутации узел-источник отправляет широковещательный пакет запроса пути, который содержит MAC-адрес источника, MAC-адрес получателя и поле обратной адресной последовательности, в начало которой каждый промежуточный узел добавляет номер входного порта. Таким образом, на каждом шаге поле адресной последовательности удлиняется пока не будет достигнут узел-получатель.

Для лучшего понимания работы алгоритма коммутации рассмотрим пример, приведенный на рис.1. Пакет запроса пути инициирует левый узел (MAC1), правый узел (MAC4) является

получателем. Показаны таблицы соседей для каждого узла, а в нижней таблице показывается, как изменяются поля обратных адресных последовательностей в пакете запроса пути и в пакете подтверждения при переходе от узла к узлу. Пробелы в полях обратных адресных последовательностей добавлены только для наглядности представления.

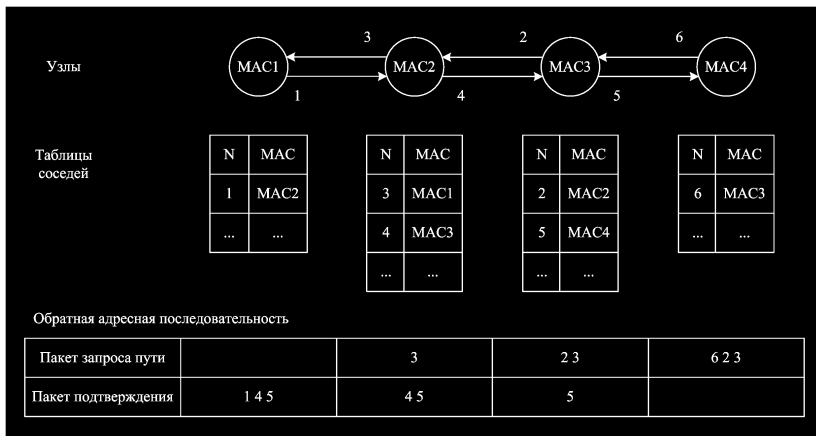


Рис. 1. Пример работы алгоритма коммутации

Для анализа длины полей, содержащих адресные последовательности, вводятся отдельные поля, в которых хранятся соответствующие значения длин адресных последовательностей и на каждом шаге значений этого поля обновляются. Необходимость таких полей диктуется переменной длиной полей адресных последовательностей. Другим вариантом является использование зарезервированного разделительного символа 0 (как в сети SpaceWire) после каждого из полей адресной последовательности. Однако следует заметить, что этот вариант увеличивает время выполнения, т.к. потребуется использовать посимвольный анализ для нахождения разделителя.

Структура пакета запроса пути приведена на рис.2а.

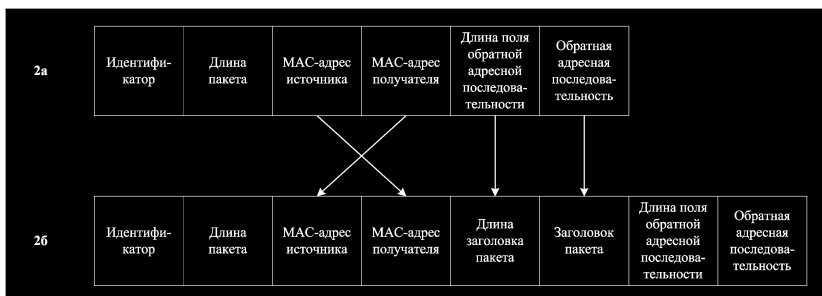


Рис. 2. Структура пакетов

Пакет подтверждения, отправляемый узлу-источнику, не является ширококестельным. Его структура практически совпадает со структурой пакета запроса пути (рис.2б). MAC-адреса источника и получателя меняются местами, в поле «заголовок пакета» копируется поле обратной адресной последовательности. По этому маршруту подтверждающий пакет передается в узел-источник. По пути следования в поле обратной адресной последовательности записывается обратный путь, как и в коммутационном пакете. Передача осуществляется по методу путевой адресации. Приняв первый символ из поля заголовка пакета, узел считывает номер следующего узла, определяет нужный MAC-адрес по своей таблице соседей, стирает символ и передает пакет дальше. Передача прекращается, когда длина поля заголовка пакета станет равной 0. При достижении узла-источника в поле обратной адресной последовательности пакета подтверждения будет содержаться прямая адресная последовательность, задающая канал для передачи информационных пакетов.

Одним из главных вопросов при использовании ширококестельных пакетов запроса пути – как избежать обратного распространения волны. Для этого предлагается использовать следующий алгоритм: каждый промежуточный узел, получив такой пакет, создает запись в своей временной таблице запросов, содержащую MAC-адрес источника, MAC-адрес получателя и числовое поле «яркость», в которое записывается значение на

единицу меньше числа своих соседей (рис.3). Далее он ретранслирует этот запрос и ожидает когда все соседи (кроме узла, от которого он получил этот запрос) ретранслируют его дальше. Получив такой же пакет от соседнего узла, он уменьшает значение поля «яркость» на единицу. Когда пакеты получены от всех соседей, поле «яркость» становится равным нулю и запись удаляется. Пока запись существует в таблице запросов, узел данный запрос не ретранслирует.



MAC-адрес источника	MAC-адрес получателя	Яркость
------------------------	-------------------------	---------

Рис. 3. Структура таблицы запросов

Поле «яркость» названо так, чтобы подчеркнуть аналогию с «зажиганием» нейрона, а яркость его свечения будет уменьшаться по мере распространения волны (получения таких же пакетов от соседей).

Обновление таблицы соседей вносит определенные сложности в реализацию вышеизложенного алгоритма. Можно выделить следующие типовые ситуации, которые должны быть учтены:

- добавилась запись о новом соседнем узле;
- запись о соседнем узле была удалена;
- за «короткий» промежуток времени происходит последовательное удаление записи, а потом добавление на ее место новой, что возможно, если таблица содержит максимальное число записей (255). В этом случае происходит как бы «подмена» MAC-адреса порта для тех информационных пакетов, маршрут которых проходит через данный узел и использует «подмененный» номер порта.

Кроме того, важно учесть время обновления таблицы соседей относительно создания и удаления записей в таблице запросов:

- таблица соседей обновилась, когда таблица запросов не пуста;
- таблица соседей обновилась через «короткий» промежуток времени после удаления записи в таблице запросов.

В качестве примера возникновения одной из таких конфликтных ситуаций рассмотрим следующую (рис.4): узел 1 ретранслировал запрос пути от некоторого узла, получил пакеты от всех своих соседей и удалил запись в своей таблице запросов. В этот момент возникает новый соседний узел (100), который получил тот же пакет по некоторому «длинному» пути. Ретрансляция узлом 100 этого пакета приведет к повторному его получению узлом 1 и возникновению петли, чего требуется избежать.

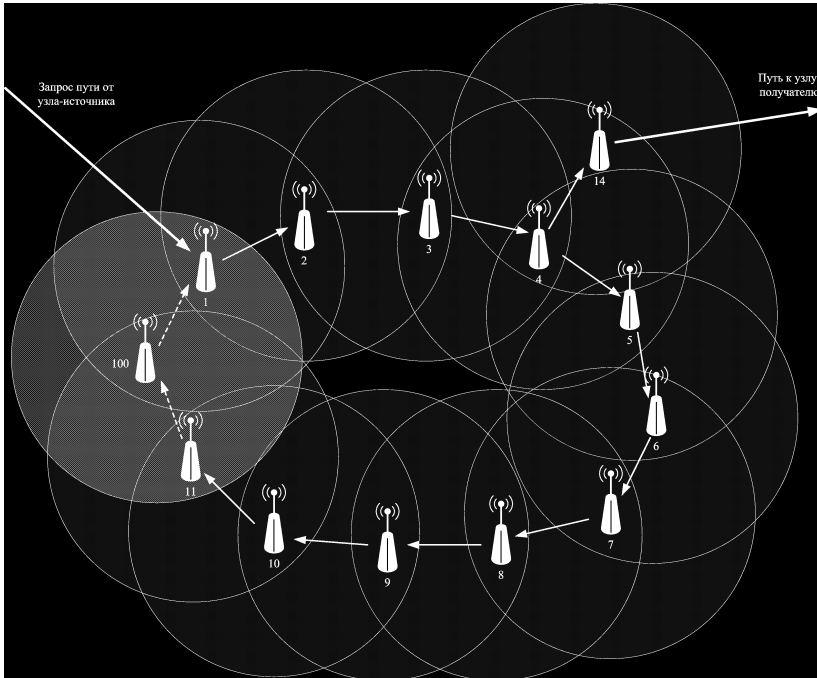


Рис. 4. Пример образования петель

Одним из вариантов борьбы с такими ситуациями является передача времени инициализации в пакете запроса пути, а также хранение времени добавления нового узла в таблице соседей. Сравнение этих показателей позволит избежать возникновения петель. Правда следует отметить, что при этом требуется обеспечить синхронизацию времени в пределах всей сети (см. п.3.2).

3.2. СВЯЗЬ

После того как узел-источник получил коммутационный пакет подтверждения, содержащий искомую адресную последовательность, он начинает передачу информационных пакетов.

Структура информационного пакета приведена на рис.5. Она практически совпадает со структурой пакета подтверждения, только добавлено поле данных.

Идентификатор	Длина пакета	MAC-адрес источника	MAC-адрес получателя	Длина заголовка пакета	Заголовок пакета (прямой маршрут)	Длина поля обратной адресной последовательности	Обратная адресная последовательность	Поле данных
---------------	--------------	---------------------	----------------------	------------------------	-----------------------------------	---	--------------------------------------	-------------

Рис. 5. Структура информационного пакета

В поле «заголовок пакета» записывается адресная последовательность (прямой маршрут). Они передаются по методу путевой адресации, как и пакеты подтверждения. Приняв первый символ из поля заголовка пакета, узел считывает номер следующего узла, определяет нужный MAC-адрес по своей таблице соседей, стирает символ и передает пакет дальше. Передача прекращается, когда длина поля заголовка пакета станет равной 0.

Поле обратной адресной последовательности содержит адресную последовательность, содержащую обратный маршрут (от текущего узла к узлу-источнику). На каждом шаге в начало этого поля дописывается номер порта, через который текущий узел получил данный пакет (определяется по таблице соседей).

Обратный маршрут требуется для двух целей: отправка подтверждения от узла-получателя об успешном приеме пакета и отправка сообщения об ошибке. Если связь разрывается в промежуточном узле и порт, через который должна осуществляться передача, перестает существовать, то передача прекращается и формируется сообщение узлу-источнику о разрыве связи, которое отправляется по обратному маршруту. Сообщение об ошибке может отправить и узел-получатель.

Заметим, что длина пакета не изменяется, поскольку длина поля заголовка пакета декрементируется, а длина поля обратной последовательности инкрементируется.

Осложнение может возникнуть, если в некотором промежуточном узле таблица соседей изменилась таким образом, что произошла «подмена» узлов, т.е. под тем же номером порта теперь записан другой соседний узел. В этом случае пакет уйдет по другому маршруту и один из следующих узлов инициирует сообщение об ошибке. В случае большого количества узлов-соседей для каждого из узлов очень вероятна ситуация, когда пакет дойдет до самого конца и только там будет обнаружена ошибка.

Одним из вариантов борьбы с такой ситуацией является передача в пакете времени инициализации, а также хранение времени добавления нового узла в таблицу соседей. Сравнение этих показателей позволит отправить сообщение об ошибке сразу же.

Для реализации такой возможности важно синхронизировать часы всех узлов. Для этого можно использовать имеющиеся механизмы синхронизации в синхронных Mesh-сетях и сетях SpaceWire. В SpaceWire существует одна станция, которая периодически рассылает временные пакеты с маркером времени длиной 6 бит ([3]). В Mesh-сетях и вообще в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11 механизм синхронизации может быть более сложным ([2]). В зависимости от типа синхронизации одна или все станции рассылают специальные кадры – биконы, основная функция которых заключается в глобальной синхронизации. Биконы содержат специальное поле Timestamp, в котором записано время передачи первого бита бикона через интерфейс. На основании этого времени происходит синхронизация часов всех станций.

4. Заключение

В статье был рассмотрен метод маршрутизации в беспроводных сетях, основанный на организации виртуального канала, при котором информация о канале хранится в передаваемом пакете. Такой подход позволяет отказаться от таблиц маршрути-

зации и, таким образом, минимизировать требования к оборудованию.

Данный подход интересен и с точки зрения разработки целого семейства алгоритмов маршрутизации, ориентированных на различные условия. Например, можно в каждом узле хранить информацию обо всех виртуальных каналах, которые через него проходят. Тогда, если узел теряет связь с одним из своих соседей, то посылается одно специальное волновое сообщение о разрыве канала связи с указанием адресов всех узлов-источников, коммутировавших через этот порт. Если узел обнаруживает себя в этом списке, то он заново отправляет коммутационный пакет.

Литература

1. ВИШНЕВСКИЙ В.М., ЛАКОНЦЕВ Д.В., САФОНОВ А.А., ШПИЛЕВ С.А. *Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s* // ISSN 1992–4178. Электроника. – 2008. – № 6. – С.64 – 69.
2. ВИШНЕВСКИЙ В.М., ЛАКОНЦЕВ Д.В., САФОНОВ А.А., ШПИЛЕВ С.А. *Mesh-сети: в ожидании стандарта IEEE 802.11s*.// ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2008. – №3. – С.98–106.
3. ШЕЙНИН Ю., СОЛОХИНА Т., ПЕТРИЧКОВИЧ Я. *Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов* // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2006. – № 5. – С.64–75.
4. IEEE P802.11s/D2.0. Draft STANDARD for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Mesh Networking // IEEE Standards Activities Department. USA: IEEE, 2008.

5. SIMPSON M., Thompson P.W. DS_Links and C104 Routers. – Networks, Routers and Transputers: Function, Performance and Applications / Ed. by: M.D.May, P.W. Thompson, P.H. Welch. – INMOS, IOS Press, 1993.
6. ZHANG J., WANG D., SHI M., WANG J. Y. Output-threshold coupled neural network for solving the shortest path problems // Science in China Ser. F Information Sciences – 2004. – Vol. 47, №1. – P.20-33.

THE WIRELESS NETWORKS WITH MOVING OBJECTS ROUTING PROTOCOL.

Andrew Efremov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (andre@ipu.ru).

Yuriy Legovich, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., Lab. Head (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-93-61).

Dmitriy Maksimov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher (phoenixjhanjaa@yandex.ru).

Abstract: The shortest path determination method based on auto-wave propagation in neuron networks is suggested to use in wireless networks with moving objects routing. The virtual channel creating in which the channel information stored in transmitting packet is used for routing protocol. This approach permits to work in dynamical changing situation and to reduce the equipment demands due to routing tables using refuse.

Keywords: autowaves in neuron networks, Mesh, wireless networks, routing protocol.